慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	HMDと移動型360度カメラを用いたテレイマージョンシステムに関する研究
Sub Title	Study on tele-immersion using HMD and mobile 360-degree camera
Author	笛木, 康人(Fueki, Yasuto) 小木, 哲朗(Ogi, Tetsuro)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2015
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2015年度システムエンジニアリング学 第213号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002015-0051

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2016 年度

HMD と移動型 360 度カメラを用いた テレイマージョンシステムに関する研究

笛木 康人

(学籍番号：81433431)

指導教員　教授　小木 哲朗

2016 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン･マネジメント研究科

システムデザイン・マネジメント専攻

Master's Dissertation 2016

Study on Tele-Immersion Using HMD and Mobile 360-Degree Camera

Yasuto Fueki

（Student ID Number：81433431）

Supervisor　Tetsuro Ogi

March 2016

Graduate School of System Design and Management,
Keio University
Major in System Design and Management

論　　文　　要　　旨

学籍番号	81433431	氏　名	笛木　康人

論 文 題 目 :
HMD と移動型 360 度カメラを用いたテレイマージョンシステムに関する研究

（内容の要旨）従来のヘットマウントディスプレイ(以下、HMD)は、高精度のヘットトラッキングセンサや高解像度のディスプレイを使用するため、全体のコストが高く、市場投入されたものも大型のディスプレイの代わりという使用方法が一般的であった。しかし、高解像度を生み出す映像表示部のコストが下がってきたことと、映像を生成するハードウェアの性能が向上したことにより、Oculus rift を始めとする、広視野角・高解像度を実現した「世界への没入感」を可能とする HMD が近年、コンシューマ向けに登場しつつある。このようなハードウェアの登場により、人々の「遠隔地を自由に移動したい」という遠隔没入感に対する要求を実現することが技術的には可能になってきた。一方、遠隔没入感であるテレイマージョンという概念はあるものの、いずれとして、大型の没入型ディスプレイを設置し、大容量の情報を送信する専用の高速回線が必要になるなど、システムの構成が大きく、一般のユーザが「気軽に」使えるシステムになっていない。

これらの状況を加味した上で、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システムの開発を研究の最終的な目標とした。普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システテを開発する上で、全体の価格や、メンテナンス性、安全性などを考慮する必要があるが、本研究の対象範囲として遠隔没入システムの「基本的性能」に対する要求を満たすことで、最終的な目標の達成に寄与する。そこで、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システムの開発を達成する手段として「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システムの開発」を本研究の目的とした。

遠隔地を自由に見る・移動する没入システムを構築するにあたって、先行研究・今後の応用シーンからシステムが満たすべき要求を明確化した。抽出された要求から機能要求を明確化し、HMD と 360 度カメラを用いた遠隔没入システムを構築した。

本研究の目的である、「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システム」が達成できているかを、プロトタイプを用いて、二つの実験を通して検証した。また、本研究の最終的な目標である、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システムかどうかを、プロトタイプを通してアンケートにて妥当性の確認を行った。その結果、本システムにおいて被験者は高い没入感を感じており、「移動」と「自由な見回し」が従来の移動システムと比べ有意に作用することがわかった。

キーワード（5 語）
ヘットマウントディスプレイ、遠隔没入感、テレイマージョン、移動、見回し

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81433431	Name	Yasuto Fueki

Title

Study on Tele-Immersion Using HMD and Mobile 360-Degree Camera

Abstract

Conventional Head Mount Display (HMD) was high overall cost in order to use the precision head tracking sensors and high-resolution display, so the general purpose of HMD was an alternative for large displays. However, cost reduction of image display unit that produces a higher resolution and hardware performance improving, new HMD that can sense immersion by achieving a wide viewing angle and high-resolution,, including "Oculus Rift", hit the streets on market. With the advent of such hardware, it is has become technically possible to implement a request for travelling remote location with immersive. On the other hand, although there is a concept of a Tele-immersion remote immersive, it required huge system such as large-scale immersive display and high-speed line that send large amounts of information. Those requirements make no chance to be used by general users. Considering these situation, the ultimate goal of this study is set as developing remote immersive system which can be used during daily life by general people. Although In the development of remote immersive system that can feel free to use in everyday life, overall cost, maintainability, and safety need be considered, this study aims to satisfy basic performance requirement of remote immersive system which will contribute to the achievement of the ultimate goal. Therefore, the purpose of this study is set as "Development of view freely and transfer remote immersive experience system" to contribute development of remote immersive system which can be used during daily life by general people.

For developing an immersive system to move and view the remote areas freely, this study clarifies the requirements to be satisfied by the system from the previous research and future applications scene. The author clarified the function request from the extracted request, and constructed a remote immersion system using the HMD 360 ° camera. The purpose of this study that is " Development of view freely and transfer remote immersive experience system " was verified by using the prototype through two experiments. Also the ultimate goal of the present study, whether remote immersive system can feel free to use in the general user of everyday life, was carried out confirmation of the validity in the questionnaire through the prototype. As a result, the subjects using the prototype felt high immersive, and "Move" and "free looked" act significantly compared with conventional mobile systems.

Key Word(5 words)

Head Mount Display, Remote immersive, Tele-immersion, Move, Scanning

目次

1.　　序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1 研究背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.1.1 バーチャルリアリティの一般への普及・・・・・・・・・・・・・・2
1.1.2 メディアの進化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
1.1.3 テレイマージョンとは・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
1.1.4 遠隔没入体験への要求・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8
1.1.5 既存のテレイマージョン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
1.2 研究目的と全体像・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・12
2.　　要件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
2.1 VR システムが満たすべき要件・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
2.1.1 VR システムの 3 要素・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
2.1.2 Presence・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・17
2.1.3 Interaction・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20
2.1.4 Autonomy・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
2.2 遠隔での VR システムが満たすべき要件・・・・・・・・・・・・・・22
2.3 本システムが満たすべき要件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
2.4 類似研究と本研究の立ち位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
2.4.1 ステレオカメラによる遠隔没入・・・・・・・・・・・・・・・・・24
2.4.2 360 度カメラによる遠隔没入・・・・・・・・・・・・・・・・・・26
2.4.3 本研究の立ち位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28
3.　　システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29
3.1 自由に見る・移動出来る遠隔没入体験システム・・・・・・・・・・・30
3.2 遠隔映像提示サブシステム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・32
3.2.1 360 度カメラとその利点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・32
3.2.2 インターネットを介しての遠隔通信・・・・・・・・・・・・・・・36
3.2.3 実空間での情報提示とリアルタイムでの情報提示・・・・・・・・37
3.2.4 HMD とその利点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39
3.3 距離感の評価実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41
3.3.1 実験環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

3.3.2 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
3.3.3 結果・考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・43
3.4 遠隔移動サブシステム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44
4. システムの評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.1 システムの検証方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48
4.2 「見回し」が移動に及ぼす影響の評価実験・・・・・・・・・・・・・49
4.2.1 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・49
4.2.2 結果・考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51
4.3 「移動」と「見回し」が空間把握能力に及ぼす影響の評価実験・・・52
4.3.1 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52
4.3.2 結果・考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・54
4.4 アンケートによる主観評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
4.4.1 評価項目・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
4.4.2 結果・考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・58
4.5 システムの妥当性確認・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
4.5.1 アンケート内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
4.5.2 結果・考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67
5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・70
5.1 結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・71
5.2 課題と今後の展望・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
外部発表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76

第 1 章

序論

1.1　研究背景

1. 1. 1 バーチャルリアリティの一般への普及

近年、バーチャルリアリティ(以下、VR)技術に新たな注目が集まっている。市場調査会社 TrendForce が発表したレポートによると、2015 年 12 月現在、VR 関連の市場規模は 2020 年までに 700 億ドルにまで拡大すると予想されている[1](図 1.1)。

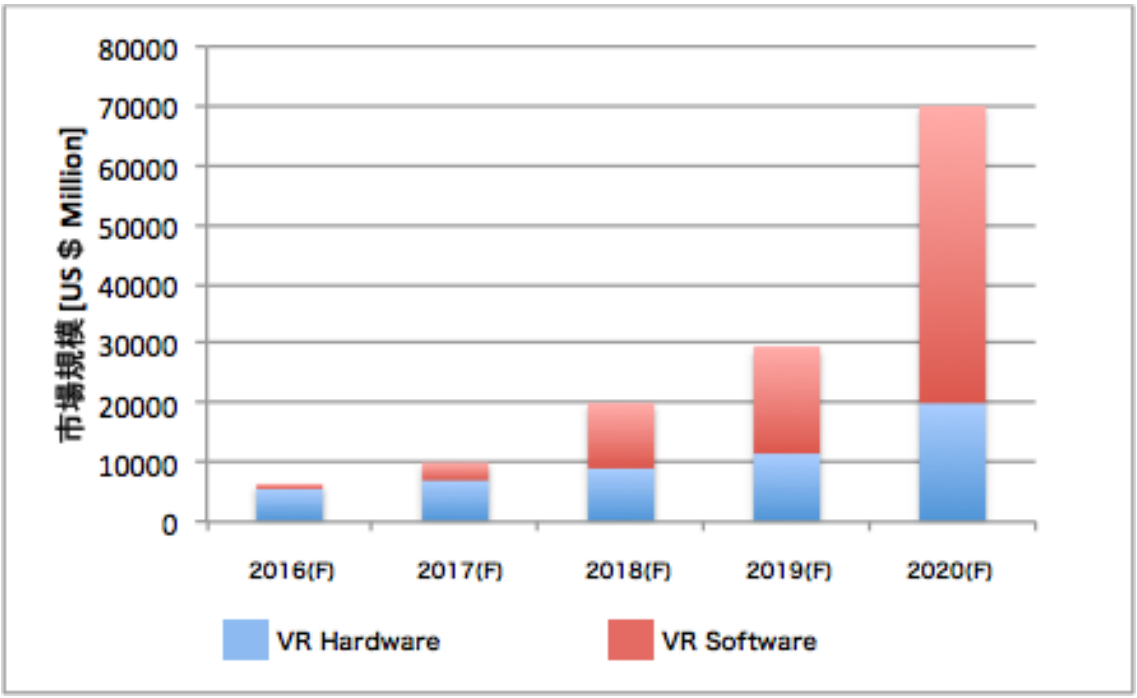

図 1.1 2020 年における VR の市場予測
出典: TrendForce ,Dec,2015

現在、VR が注目を集めている理由の一つとしては、2016 年度から各社から発売が予定されているヘットマウントディスプレイ(以下、HMD)の登場が挙げられるであろう。Oculus VR 社が発売する Oculus Rift の生みの親であるセルゲイ・オルロフスキーは 2012 年、これまでにない広視野角・高精度のヘッドトラッキングシステムを搭載した HMD を発表した。この HMD の最大の特徴は表示部に魚眼レンズを設置し、映像を PC で補正するという原始的な行動を採用

したことによる安価性である。それまでの HMD の価格は数十万円～数百万円と非常に高価であった。それゆえ、主に軍事や研究用途にとどまっている。1990 年代には市場に投入された物もあるが、画角が 20～30 度であり、主に大型の TV の変わりが主な用途となっていた(図 1.2)。2012 年にはソニー株式会社から有機 EL ディスプレイを採用した HMD が登場した。90 年代に発売された物と比べても価格も数万円程度と安価にはなっていたが、頭部の動きに対して映像が変わるヘッドトラッキング機能はなく、画角も 90 度程度のため「視野全体を覆う」という感覚ではなく、こちらも主に大型のディスプレイの代わりとして売り出された。

図 1.2 1990 年代に市場に投入された HMD の例
ソニーマーケティング株式会社 『PLM-A35』

Oculus VR 社が発表した HMD である Oculus Rift はそれまでの「大型のディスプレイの変わり」といったコンセプトではなく、人間の視野に近い広視野角なディスプレイ・レンズと、ヘッドトラッキング機能を採用したことによる「世界への没入感」を目標としたシステムを構築している。この今までとは異なるコンンセプトである HMD を発表したことによってキックスタートでは当初の目標金額の 10 倍もの金額を集めた。こうしたシステムを比較的安価に実現できるようになったのは、高解像度のディスプレイ技術と映像を処理する PC の技術的発展によるところが大きい。2016 年には Oculus rift 以外のメーカーか

らも一般ユーザ向けの HMD の発売が予定されている(図 1.3)。世界規模の SNS を展開する Facebook 社はこうした流れに目をつけ、2013 年に Oculus rift を正式に買収し、世界的な動画共有サイトである YouTube は、360 度動画を観覧できるサービを開始した。こうした VR デバイスの一般ユーザへのサービス化の流れによって、近年、VR 市場は新たな盛り上がりを見せていると考えられる。

VR 産業はまだ黎明期であり、ソーシャルメディア・ネットワーク(SNS)などとの連携により、今後、ますます市場規模が拡大すると考えられる。

図 1.3 2016 年に各社から発売が予定されている HMD の例
(左上)Oculus VR 社『Oculus rift』(右上)Sony Computer Entertainment 社『Playstation VR』(左下)FOVE 社『FOVE』(右下)HTC 社『VIVE』

1.1.2 メディアの進化

現在、我々が使用している様々なメディアを使用し、情報をやり取りしている。画像・映像メディアを中心に見てみると、その歴史は今から 1 万年以上前のフランスやスペインの洞窟に描かれた動物の壁画まで遡ることができる。近代になると、絵画の技術が発達し、その表現手段は大幅に向上した。19 世紀には「写真」が発明されたことにより、劇的なリアル性をもたらした。19 世紀末には写真を連続で撮影し、投影する「映画」が登場したことによって、映像に動きを与えることに成功した。20 世紀には遠隔地の状況を同時進行で再現する「テレビ」が発明されたことによって、メディアにリアルタイム性をもたらした。こうしたメディアは発信側が受け手に情報を与える言わば、受動的なメディアであった。20 世紀後半のインターネット通信を介した「マルチメディア」の登場は受け手も情報発信に関与できる双方向メディアとなりつつある。

それでは、この後メディアはどのような方向に向かっていくのであろうか。原島はその著書[2]の中で、既存のメディア技術の進化は、それぞれの表現軸方向の量的な拡大と解釈できるとしている。例えば、テレビを例にとると初期の白黒テレビからカラーテレビへの技術的な進化は「表現力の拡大」と解釈することができる。ハイビジョン化の流れによる高精細化は「空間軸方向の拡大」であり、3D 技術の搭載は、2 次元から 3 次元への「次元方向への拡大」とみなすことができる。こうしたメディア技術の発達によるそれぞれの軸方向の表現力の発達は高い臨場感を生み出すことにつながっている。洞窟の絵から始まり、現在のマルチメディアまでの流れは「高臨場感」を生み出すことにつながっていると考えられる。

これを前提に、この後のメディアの流れを考えてみる。メディア技術の発展が及ぼす臨場感の高度化が目指すところとしては、時間や空間を超えてあたかもその場に臨んでいると同じ感覚を与えることを目標としている。これは人が持つ五感の情報を物理的に忠実に取得・伝達・再生することによって実現される。今日では、マルチメディアを次世代の高臨場感メディアとして進化させるべく、VR 技術を応用した製品やサービスが登場しつつある。

2008 年に全米科学財団(NSF: National Science Foundation)が発表した今世紀中に達成すべき 14 の重点技術目標の中の一つとしても VR が挙げられているように、VR 技術を伴った高臨場感メディアが普及する可能性は十分に高いと思

われる。前述したように、「世界への没入感」を目標としている HMD の登場により、その実現可能性は大いに高いと考えられる。

1.1.3 テレイマージョンとは

高い臨場感を持ったまま遠隔地とのインタラクションを行う概念としてテレイマージョンがある。遠隔地同士をインターネットや専用回線で結び、CAVE に代表されるような高い臨場感を伴った没入型ディスプレイに情報を提示することによって、ユーザ同士がまるで一つの空間にいるような臨場感を味わえる。元々は従来のようなディスプレイ上の画面で行うようなテレビ会議の代わりとなる新しい対話システムを目指して構築された。遠隔地との情報共有手段として Skype などのテレビ会議システムがあるが、人間の目線や細かな挙動などの非言語的なコミュニケーションをするにあたって不完全なシステムである。例えば、画面同士では正確にアイコンタクトを取ることは不可能であるし、ユーザが互いの空間的な位置関係を正確に把握することも難しい。それらを解消する手段としてディスプレイやインタラクションなどの VR 技術とリアルタイムでの大容量のデータ通信を可能とするネットワーク技術を組み合わせたテレイマージョンという概念が生まれた(図 1.4)。

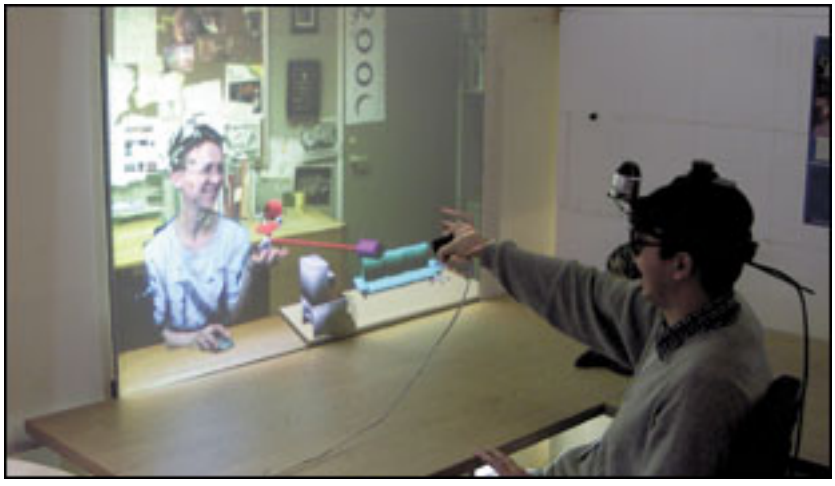

図 1.4 インターネット 2 を用いたテレイマージョンの例
出典:『Tele-immersion: Tomorrow's Teleconferencing』, Jan, 2001

似たような概念として「テレイグジスタンス」や「テレプレゼンス」といった概念がある。テレイグジスタンスはロボットを遠隔で制御する際に、エグゾスケルトンのようにロボットの中に入り込んで自分がその場にいるような感覚で操作を行う。人が遠隔地に実際に存在しているかのような高度の臨場感をもって作業やコミュニケーションを行うための技術を指す(図 1.5)。

図 1.5 テレイグジスタンスシステムの例
東京大学大学院情報理工学系研究科 『TELESAR２』

テレプレゼンスはテレイグジスタンスと同時期に提案された概念であり、テレイグジスタンスが自分を遠隔地に提示させることによって、自分自身が遠隔地に存在しているように見せかける概念であるに対し、テレプレゼンスは遠隔地の映像をこちらに提示することによって自分自身の周りに遠隔地を持ってくるという概念である。どちらも空間的に離れた遠隔実世界にあたかも実際にいるかのような没入感を与えるという点では変わりない。これら３つの概念は細かい点では異なるが、「実世界への遠隔没入感」という点では共通している。本研究では「遠隔没入体験」としてテレイマージョンを用いている。

1.1.4 遠隔没入体験への要求

現在、我々は様々な手段を使って遠隔地の情報をやり取りしている。古くは狼煙といった端的な情報を使用し、遠隔地との情報共有を試みた。やがて、技術が発達するにつれ、電気信号の有無によって言語を解釈するようになり(モールス信号)、音声を電気信号に変換し、送信する電話が生まれた。音声だけのやりとりから、同時に映像を送信することによって遠隔とのインタラクションを行うことができる、テレビ電話が生まれた。今日では、Skype に代表されるようなインターネット通信を介したビデオチャットの登場によって、世界中のあらゆる場所と、音声と映像を用いたコミュニケーションを行うことが可能となった。さらには、パソコンの画面を見ながらロボットを操作し、能動的に周囲を移動しながらコミュニケーションができる Anybots QB[3](図 1.6)や、Double[4](図 1.7)といったシステムも開発されている。こうしたロボットは主に他者とコミュニケーションをとるといった目的で開発されており、その機能として移動性を持ち合わせている。実際にロボットを操作して遠隔地で行われている会議に出席するという例も見られる。

図 1.6 Anybots QB[3]

図 1.7 Double[4]

その場に実際にいるような感覚を味わえるサービスに、全周囲の映像を一度に撮影できる 360 度カメラを用いて撮影した全天周映像を配信するサービスも

登場している。スマートフォンを任意の方向に傾けることで、従来のように鑑賞するディスプレイの画角に囚われない自由な見回しが可能となる。InstanTRIP[5]や ittaki[6]では、360 度カメラで撮影した観光地の映像を HMD に通して提示することで、自宅にいながら観光地に行ったような体験を提供するサービスを行っている。また、Omnipresent[7](図 1.8)のように、頭部にカメラを装着した人間を遠隔地に派遣し、ユーザはリアルタイムに送られてくる映像をモニター越しに見ながら指示を出すことでアバターを通して旅の疑似体験をするサービスも提案されている。Google 社が提供している Google Street View では、360 度カメラで撮影した映像を自由に見回せる他に、自動車に搭載したカメラを一定間隔で撮影したことで、その世界の中で移動性を持たせている。

これらのサービスの流れから、遠隔地の風景をまるでその場にいるような感覚で見たいという要求だけではなく、その世界の中を自由に移動したいという要求があると思われる。

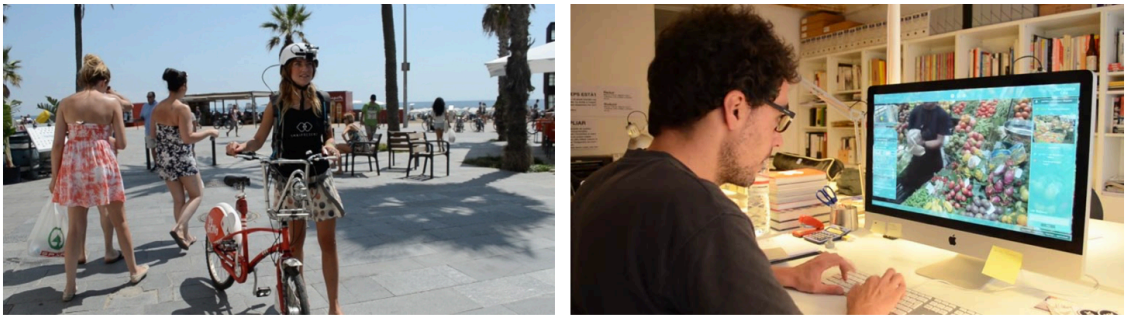

図 1.8 人間をアバターとした疑似旅行体験[7]

1.1.5 既存のテレイマージョン

テレイマージョンの特徴としては、遠隔地との情報共有と世界への没入である。既存の遠隔地との情報共有手段としては、電話や Skype に代表されるようなビデオチャットシステムがあるが、世界への没入という点では異なっている。

ユーザに高い没入感を生み出すデバイスとして大型の没入型ディスプレイを使用したテレイマージョンシステムがある。CAVE を代表とする大型の多面型映像投影ディスプレイを使用した研究では、仮想空間内に自分自身の実映像の

アバターを提示し、３次元表示することによってその場にいるような感覚でコミュニケーションを行う研究がある。大型のスクリーンを立方体状に配置し、その中でユーザが立体映像を見ることで高い臨場感を持った仮想空間を体験できる。この没入型ディスプレイと３次元のビデオアバタを組み合わせることで、実物大の人物映像を没入型３次元仮想空間に合成して表現することによって臨場感のあるコミュニケーションを実現する[8](図 1.9)。

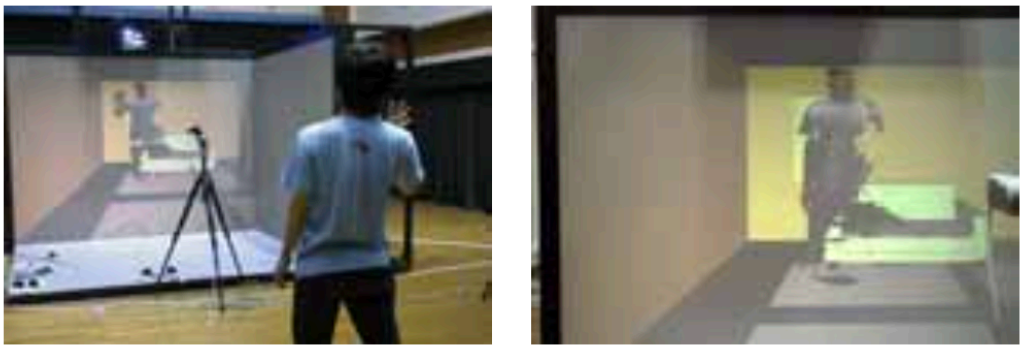

図 1.9 ビデオアバタを用いたコミュニケーション[8]

従来のディスプレイを用いた遠隔授業のかわりとして、没入型ディスプレイを用いた研究もされている。遠隔地での臨場感のある授業を実現するために２つの没入型ディスプレイをネットワークで結び、一方に教師、もう一方に生徒が入る。教師が予めデータベースに保存してある画像や３D モデルデータを用いて授業を行う。生徒側のディスプレイでは教師の全身のビデオアバタ、開いている講義資料や指し棒の動きなどが立体映像として映し出される[9](図 1.10)。

また、遠隔地の風景などをリアルタイムで没入型のディスプレイに投影する研究もある。TWISTER では裸眼での 360 度の立体視映像を実現するために複数の提示ユニットがついたレールを高速で回転させることで、没入感のあるディスプレイを構築している。複数のカメラで取得した遠隔地の映像をつなぎ合わせ、360 度の映像を生成、提示することで没入感のある遠隔地映像を提示する[10](図 1.13)。

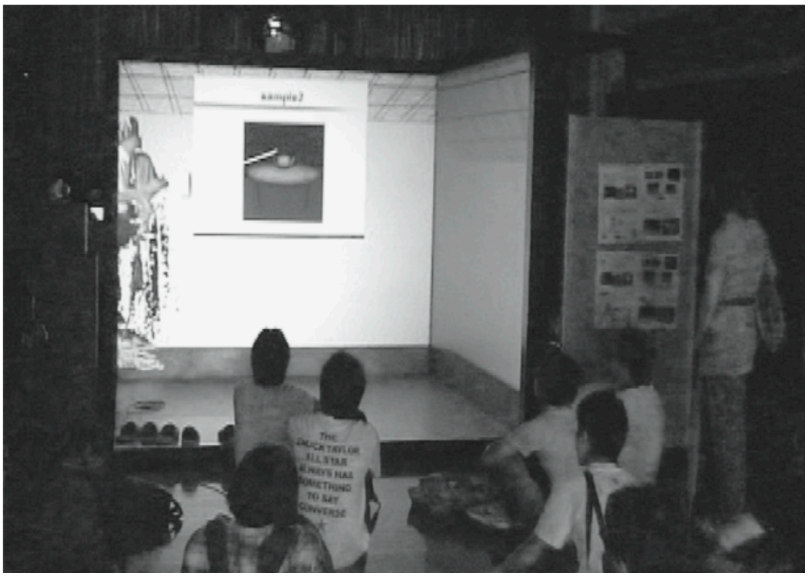

図 1.10 CAVE を用いた遠隔授業[9]

図 1.11 TWISTER を用いたリアルタイムの遠隔地没入[10]

こうした遠隔没入システムは高い没入感を持つが、視野を覆う大型ディスプレイを必要とするため、設置場所が限られてしまう。そのため、「一般ユーザが普段の生活の中で自然に使う」という利用シーンではなく、主に研究用途に限られている。また、テレイマージョンは元々、CAVE などの大型没入ディス

プレイを用いてのコミュニケーションを目的にしていたので、大量のデータを遠隔地に送信する必要があった。そのため、「移動」を含めたテレイマージョンシステムは多くない。本研究では、専用の高速回線を使用することなく、一般的なネットワーク環境下での、無線通信を使用してデータ量を抑えたイマーシブルなテレイマージョンシステムを構築する。

1.2 研究目的と全体像

従来の HMD は、高精度のヘッドトラッキングセンサや高解像度のディスプレイを使用するため、全体のコストが高く、市場投入されたものも大型のディスプレイの代わりという使用方法が一般的であった。しかし、高解像度を生み出す映像表示部のコストが下がってきたことと、映像を生成するハードウェアの性能が向上したことにより、Oculus rift を始めとする、広視野角・高解像度を実現した「世界への没入感」を可能とする HMD が近年、コンシューマ向けに登場しつつある。このようなハードウェアの登場により、人々の「遠隔地を自由に移動したい」という遠隔没入感に対する要求を実現することが技術的には可能になってきた。一方、「遠隔没入体験」を意味するテレイマージョンという概念はあるものの、いずれとして、大型の没入型ディスプレイを設置し、大容量の情報を送信する専用の高速回線が必要になるなど、システムの構成が大きく、一般のユーザが「気軽に」使えるシステムになっていない。

これらの状況を加味した上で、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入体験システムの開発を研究の最終的な目標とする。一般消費者が製品に求める基本的な要求として、「基本的機能の性能」「時間的な機能劣化や維持、経済性」「オプション等による機能の拡大」「生活環境との調和」「製品の仕様に伴う安全、保守」の５つの評価因子があると秋庭は述べている[11]。そのため、普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入体験システを開発する上で、全体の価格や、メンテナンス性、安全性などを考慮する必要があるが、本研究の対象範囲として遠隔没入システムの「基本的機能」に対する要求を満たすことで、最終的な目標の達成に寄与する。そこで、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入体験システムの開発を達成する手段として**「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システムの開発」**を本研究の目的とする。

自由に見る・移動する遠隔没入体験システムを構築するにあたって、先行研究、今後の応用シーンからシステムが満たすべき要求を明確化した。抽出された要求から機能要求を明確化し、実現可能性を含めながら仕様を選定し、プロトタイプを構築した。

本研究の目的である、「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システム」が達成できているかを二つの実験を通して検証した。また、本研究の最終的な目標である、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システムかどうかを、プロトタイプを通してアンケートにて妥当性の確認を行った。

第2章

要件

2.1 VR システムが満たすべき要件

2.1.1 VR システムの 3 要素

VR システムが満たすべき要件を定義するにあたって、まず、VR とは何なのかを説明する必要が有る。バーチャルリアリティという言葉を最初に使用した VPL(Vsiual Programming Language)社のジャロン・ラニアー(J.Lanier)はシステムを説明する概念として「コンピュータによって人工的に合成された現実世界」という意味で使用した。日本バーチャルリアリティ学会のホームページ[12]を見ると、バーチャルは virtue の形容詞で、virtue は、その物をその物として在らしめる本来的な力という意味からきており、バーチャルリアリティの定義として、「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」を与えるとある。

VR を実現するシステムの標準的な構成要素としては、「入力システム」「シミュレーションシステム」「出力システム」の 3 つがある (図 2.1)。この 3 つのシステムが相互作用することによって仮想現実(Virtual Reality)の世界が生まれる。

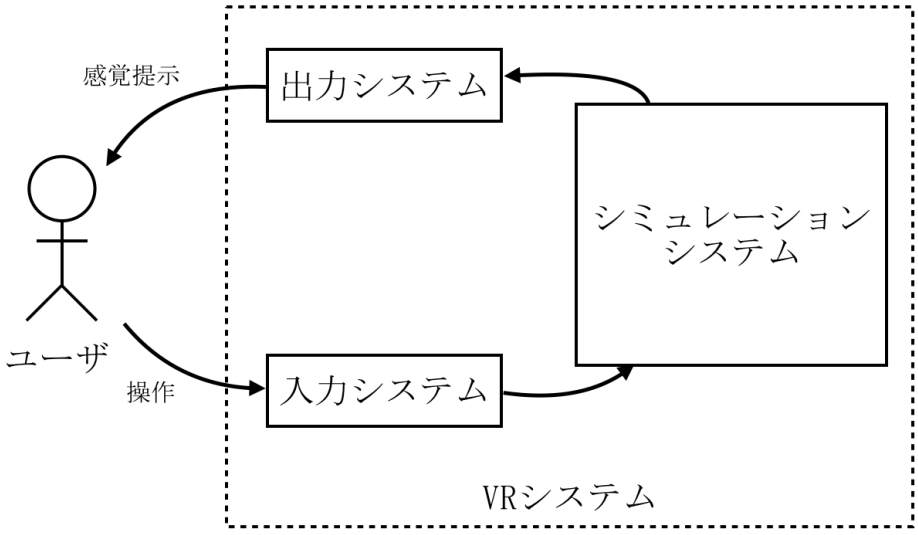

図 2.1 VR システムの構成要素

入力システムとは、人間からシミュレーションシステムへの情報の流れを制御する部分であり、体験者の情報を計測し、シミュレーションシステムに入力することによって仮想世界を運転していく。キーボードやマウスだけではなく、データグローブなどもこれにあたる。

出力システムとは、シミュレーションシステムから人間に対する情報の流れを制御する部分であり、あたかも現実のような高い臨場感で情報を提示することが求められる。前述した CAVE システムや HMD もこれにあたる。

シミュレーションシステムは、コンピュータの中で、人工的な因果関係の連鎖をシミュレーションで作り上げる部分であり、VR 世界そのものを構成する。上記２つはユーザとシミュレーションシステムのインタフェースを司るための要素であるといえる。

３つのシステムを通して現実世界の全ての要素をシステム上で再現することができれば、それは現実そのものになるが、現実的には不可能である。ある目的を達成する上で、重要な要素を抽出し、再現したものが VR システムである。本研究も入力システム→シミュレーションシステム→出力システムを通して「あたかもその世界に入り込んでいるような感覚」を提示することを目的としているシステムであり、その意味で VR システムの構築を前提としている。

VR を構成する要素として、MIT メディアラボの D.Zelter は AIP キューブを提案し、VR システムは以下の３つの要素から成り立っているとした[13](図 2.2)。

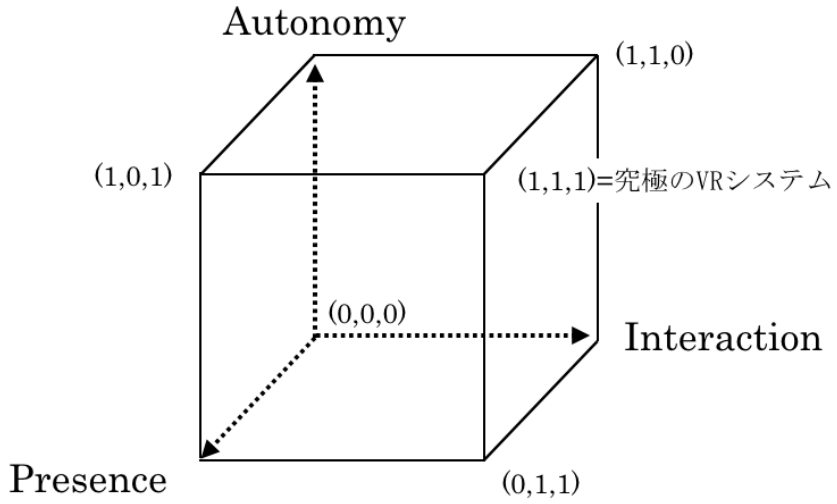

図 2.2 AIP キューブ[13]

(1) P は Presence(臨場感)であり、体験者がどれだけ提示された空間の中に没入している感覚を得られるかを指す。

(2) I は Interaction(対話性)であり、人間が提示された空間の中で、実時間の相互作用をしながら自由に行動できるかどうかを指す。体験者の行動に対してどれだけ実時間で情報を提示できるかを問題としている。

(3) A は Autonomy(自律性)であり、見かけ上、作り上げられた仮想世界が現実と同じような物理法則に基づいて成り立っているかどうかを指す。

VR とは、これら 3 要素を有したシステムを構成して、人間が実際の環境を利用しているのと本質的に同等な状態でコンピュータの生成した人工環境を利用していることを狙った技術であり、VR に携わるシステムが満たすべき必要不可欠な要素である。これら 3 つの要素を完全に有しているのがいわば完全な VR であり、図 2.2 の立方体の頂点(1,1,1)にプロットされる。

例えば、臨場感のある 3D 映画などは、大画面・立体音響など、臨場感は十分にあるものの、ただ、提示された映像を鑑賞するだけであり、見た映像に触れることができたり、映像の後ろに回りこむなどの動作はできない。よって、対話性や自律性は持ち合わせていないために(0,0,1)にプロットされるであろう。また、空間との対話性があるシステムとして一般家庭におけるゲームがある。API の要素を持ち合わせているが、目の前のディスプレイをみるだけであるので、没入感に欠ける。また、操作するコントローラもあたかも環境に入り込んだかのような状態で操作できるものでもない。それぞれが十分ではないため、(0.5,0.5,0.5)にプロットされるであろう。この 3 つの因子が、VR システムが満たすべき必要条件だとし、本システムが満たすべき要件について深堀する。

2.1.2 Presence

まず、前提として本システムが満たすべき機能として、「見る」と「移動する」がある。すなわち、Presence について臨場感を生み出す様々な要素のうち、視覚情報についての臨場感を確保することで、より高い臨場感を生み出すことを目指す。

臨場感を生み出すにあたって、まず「臨場感」とは何かを問う必要がある。寺本らは普段、我々が使っている「臨場感」について、一般人が日常生活にお

いてどのようなイメージを持っているかを調査した[14]。その結果、「臨場感」がある状態とは、聴覚・体感メディアを通して、「楽しく」「迫力」「動感(活動性)」があるコンテンツが提供され、「その場で実際に体験しているような感じ」を受ける心理的状況であることがわかった。すなわち、「高い臨場感を持つ」とは、「まるで、その場にいるような感覚がする」状態だと言える。

本研究では、臨場感＝まるでその場にいるような感覚を生み出すために、視覚特性に特化したシステムを構築することを前提としている。高臨場感を生み出すために期待される視覚特性の基本条件として、畑田[15]は、

●忠実再現による自然感を生み出す「高解像度」映像
●空間融合と迫力を生み出す「大画面」表示
●再現情報との能動的な関係を生み出す「立体」表示

があり、これらを満たすことで高い臨場感を得られる映像システムができるとしている。それぞれの条件を整理してみる。

人間の目が違和感なく映像を表示するために必要な画素数は、光の量や本人の視力によってバラバラであり、スクリーンの大きさや距離にも依存する。Roger N. Clark[16]は人間が持つ目の解像度について計算した。人間が見分けられなくなる最小の幅を 0.59 分(60 分=1 度)とし、人間の視野全体にディスプレイを広げた場合、5 億 7600 万画素のディスプレイが必要となる。実際は、人間の目がはっきり見ているのは中心の 2 度程度なので、その範囲に限って言えば 700～800 万画素で可能だが、高い臨場感を生み出すためには広い視野角を持つディスプレイが必要であるので不十分である。実際には、5 億 7600 万画素のディスプレイに表示できるだけの情報を随時送り続けるのは非現実的であるので、臨場感を生み出す 3 つの要素を考慮したシステムを構築し、ユーザの主観評価にて総合した臨場感を評価する。

高解像度の画面をより効果的に表示するには、対象物体の実物大以上の再現が要求され、画面サイズの大型化が必要となる。一般的なディスプレイを視認する際、ディスプレイの画面は平面に認知されるが、ディスプレイが大型化し、

画面枠の制約が気にならなくなると、平面映像であっても奥行き感と迫力を感じるようになる。このように、大画面化によって「画面」の存在感が弱くなると、再現空間との融合感も加わり、臨場感が高くなる。では、どの程度の視野角が必要なのか。必要な視野の広さはその人間の行動目的によって変化する。例えば、手先などの範囲の作業をする際には、中心５度以内は高密度な情報識別が可能な機能を持ち、その周辺（垂直:70 度、水平:９０度までの範囲)は時間変動などを判断する機能に分かれている。また、近距離の物体を識別する際には、両眼視が寄与するので、その動く範囲は全視野の半分を占める。そのうち、眼球運動で瞬時に情報が受容できる範囲として有効な視野(垂直:20 度、水平:30 度)や、眼球・頭部運動などが無理なく動く範囲(垂直:45 度、水平:60 度)などが見出されている。このように狭い範囲に集中した動作を行う場合はある程度の狭い視野角を持つディスプレイでも対応が可能だが、本システムは移動を前提とした見回しを含むシステムである。畑田も、位置移動を伴う作業環境の再現には、周辺視と両眼視の機能を十分に発揮できる広い視野角が要求されるとしている。では、移動を伴うシステムにはどの程度の視野角が必要とされるのか。

視野情報が被験者の運動感覚に影響を及ぼす感覚として、視線誘導自己運動感覚(Vection)という感覚がある。Vection とは、一定方向に運動する視覚パターンを観察した際に、観察者がその逆方向に運動しているかのように知覚する錯覚現象・感覚である。例えば、静止した電車に乗った際に反対方向に向かう電車が発車した場合、あたかも自分が前進しているかのように錯覚してしまう。このように、映像に対して逆方向の向きに移動感覚を得られることを誘導運動、特に、視覚情報によって自分が動いて感じられる場合を視線誘導自己運動感覚(Vection)という。ディスプレイの視野角が被験者の Vection に及ぼす実験[17][18]では、視野角が 20 度近辺から誘導が生じ始め、80～100 度以上で飽和状態となると報告している。主観的な評価では、110 度以上の周辺視野からの誘導効果への影響はほぼないとしている。以上から、移動をする際に「あたかも自分が移動している」とユーザに感じさせる為には、人間の視野角の内、80 度以上の視野角を確保することで高い臨場感を生み出すことができる。

前述したように、画面を大型化することは体験者に表示面の意識を弱め、映像に立体感を出すことにつながる。他に、物が立体的に認知される要因として、心理的・記憶的要因と生理的要因がある。前者は、２次元画像を見た場合でも

心理的・経験的な要因によって３次元情報を知覚することができる。例えば、奥にある物は近くにある物によって隠される。これによって、２者の位置関係を把握することができる。また、大きい物は近くに、小さい物は遠くにあるように見えたり、影が地面に投射されるなどして立体感を認知できる。本システムは、遠隔地の実物の映像提示を前提としているため、体験者の心理的・体験的な要因を満たした映像を提示できていると言えよう。生理的な要因としては、両眼視差、輻輳角、焦点調整、運動視差などがある。本システムは、移動時には運動視差が生じる為、ある程度の立体感を保てるが、静止時には運動視差は生じない。ステレオカメラを使用する際には両眼視差により立体視が可能だが、一つのカメラを使う場合は適切な距離感の評価が必要である。

2.1.3 Interaction

Interaction とは、体験者が提示された空間の中で、どれほど自由に行動できた感覚が損なわれずに感じられたかを指す。例えば、ある入力をした際にその行動が空間に反映され、出力システムに対してフィードバックがされる際に、短時間で一連の動作が処理されたならば、体験者はその世界との高いインタラクションを感じることができる。ここでは、どれほど実際の時間感覚に近く動作を処理できたかが重要になる。

遠隔地との Interaction を行う際、どのような動作をさせるかはシステムの目的によって変化してくる。本システムは遠隔地を自由に見る・移動するシステムであるので、「移動」「見回す」という動作に対していかに映像の遅延を抑えるかが重要になってくる。「見回す」という操作の場合、CAVE のような大型の没入型ディスプレイを使用し、あらかじめ体の周囲に映像を提示すれば自分の首の動きに対しての映像提示の遅延は問題なくなってくる。しかし、HMD のような眼球だけを覆うシステムの場合は頭部の動きに対して短時間で表示映像を写し変える必要がある。

HMD を用いて遠隔地との通信を行う際の時間遅れの研究は数多くされており[19][20]、Robert S. Allison らの報告[21]によれば、一般に遅延を認識できる閾値は 100～200[ms]だと言われている。これを超えてしまうと、頭部を動かしても映像に変化は生じず、実空間とバーチャル環境の整合性が破綻し、本来空間に静止すべき物体がバーチャル空間に漂うように認知されてしまう。特に、

HMD の場合、頭部の動きに対しての映像遅れは体験者の酔いにつながることが知られており、遠距離との通信環境に依存しないシステムの構築が求められる。

まず、「見回し」を生むためには、どの程度の範囲の画像を確保すればいいのだろうか。人間の首の可動範囲は限界があり、斎藤らの報告[22]によると、首の回転運動には、関節の緊張、靭帯・骨の突起、軟骨組織・筋の緊張などの人体的な要因や年齢、性別、姿勢、利き腕などの個人的な要因により、首の運動角度には個人差があるとされている。無理なく自然に首を動かせる範囲としては、屈曲運動時は 47～65 度、回転運動時には片側 37～66 度ほどの稼働が可能であるとされている。大分個人差が見られるが、カメラが撮影するに必要な画角は Vection が発生する視野角と合わせて最大でも 210 度程度の範囲を撮影することができれば十分であることがわかる。

2.1.4 Autonomy

VR システムが満たすべき要件のうち、Autonomy(自律性)という概念について Jacques TISSEAU[23]は「環境に起こる未知の変化に対応できること。知覚、行動、および知覚と行動の調整という３つの手段を備え、環境に生じた変化に現実的に対応できる」とした。つまり、自律性とは作り上げられた世界が何かしらの法則に基づいて処理されていることを意味する。例えば、ボールを投げた際、現実世界ではニュートンの法則に基づいて放物線を描いて地面に落ち、バウンドし、やがては停止する。これは体験者の意図とは全く別に起こる現象であり、仮想世界の中でも、このように定められた一定の法則に基づいて物事が進んでいかなければならない。

構築するシミュレーションに関しては、その VR システムの目的にもよるが、大きく分けて以下の３つがある。

物理世界・・・地球上と同じ物理法則で成り立つ。設計支援や自動車などのシミュレータなどで用いられる。

準物理世界・・・地球での物理法則を離れるが、確かに存在している物理法則で成り立っている。月や量子学的なミクロの世界など。未知の体験をさせる学習用途などで用いられる。

非物理世界・・・ファンタジーや芸術の分野では上記の法則は必ずしも必要ではなく、独自の物理法則で働く。

本システムは遠隔での現実世界を提示することを前提としているため、提示する世界はすでに自律性を持っているとも言える。そこで、問題になるのがその世界をいかに実空間に等しく提示できるかという点である。提示する世界自体はすでに自律性を持っているにもかかわらず、体験者に不自然な形で知覚がされてしまっては、違和感につながる。例えば、空間が歪んでいたり、空を見上げたら世界に空間が空いていたなどしていたら、世界が自律しているのにも関わらず、それが自律していると受け止められなくなってしまう恐れがある。真田[24]は、自律性はシミュレーションシステムが担うものであり、入力システムから得られた情報に対し、シミュレーションシステムから、見かけ上現実世界と同じ振る舞いが自律的に返される必要があり、具体的には、対象のバーチャル空間の生成、モデリング技術、シミュレーション技術、物体の操作技術、通信技術など、多くの機能を担当するとしている。よって、カメラから取得した遠隔地の情報からいかに実空間に近いバーチャル空間を生成できるかが問題となる。

2.2 遠隔での VR システムが満たすべき要件

前述したように、遠隔地の風景を伝送しそこに存在しているかのように見せる研究はいくつもある。その中でも、廣多ら[25]は自宅やオフィスのような場所から遠隔地に移動したかのような体験を手軽に実現することを目的としたユビキタステレイグジスタンスという概念を提唱している。システムはユーザ側のコックピットと遠隔地に設置された没入先のロボットからなり、ユーザは好きな時に好きなロボットを選択して、コックピットを介してログインすることで、世界中の任意の地点に瞬時に移動したかのような体験を与える。その中で、ユビキタステレイグジスタンスを満たす要件として「没入感」「リアルタイム性」「場所の偏在性」の３つを挙げており、「インターネットを介して世界中のあらゆる場所に瞬時に移動したかのような没入感を与える」という点では本研究の目的と変わりない。

また、石川ら[32]は、利用者が遠隔地の動的環境中をライブかつ自由な視線方向や視点位置で鑑賞可能な高臨場感システムとして、「動的な撮影環境全体に対応」「ライブ映像からの自由視点画像生成」「利用者の動作に応じた画像提

示」「遠隔地映像の伝送」を必要な機能としてあげている。

これらから、遠隔地での没入体験を提示すると言う点で、遠隔性を本研究における要件の一つと捉え、インターネット通信によるネットワーク性を本研究の満たすべき要件とする。

2.3 本システムが満たすべき要件

以上のことから「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システム」における要件を以下のように整理する(図 2.3)。

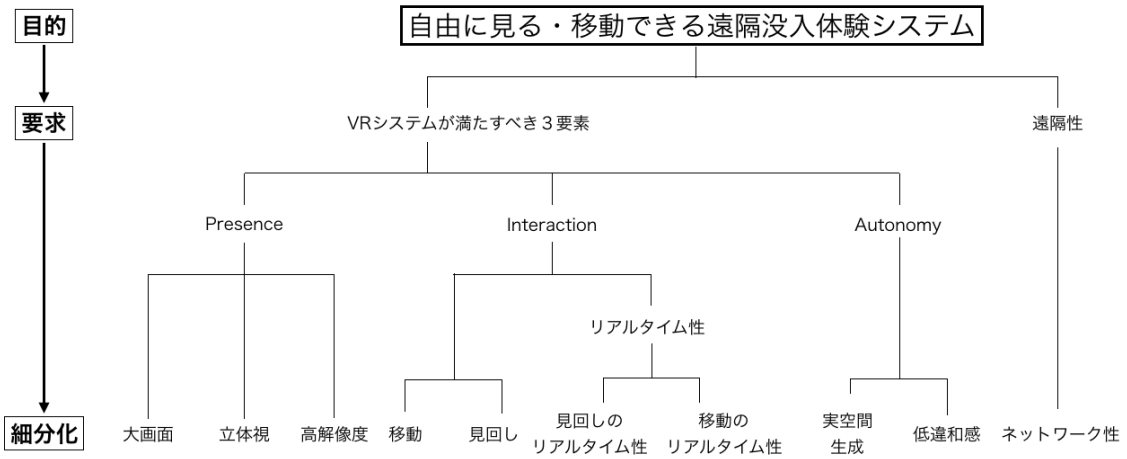

図 2.3 自由に見る・移動できる遠隔没入体験システムにおける要件

●VR システムが満たすべき要件

▸没入感

○高解像度：主観的評価にて判定

○大画面：80 度以上の視野角の確保

○立体視：静止時における適切な距離感の評価

▸対話性

○移動：無線通信での移動

○見回し：210 度以上の視野角での撮影

○リアルタイム性

♦移動性のリアルタイム性：主観的評価にて判定

♦見回しのリアルタイム性：映像生成までの遅延が 200[ms]以下

▸自律性

○低違和感：主観的評価にて判定

○実空間生成：実空間モデルの生成

●遠隔性

▸ネットワーク性：グローバルエリアネットワーク(GAP)を介しての通信システムの構築

2.4 類似研究と本研究の立ち位置

2.4.1 ステレオカメラによる遠隔没入

CAVE などの大型没入システムは高い没入感が得られるが、システムが大規模なものになってしまう。比較的簡単に、高い没入感が得られるデバイスに HMD がある。利用者の目をディスプレイで覆うことによって比較的小さな規模で高い没入感を得ることができる。廣多らの考案したシステム[25](図 2.4)は、遠隔地にあるステレオカメラと HMD をインターネット通信で結ぶことにより、遠隔地の没入体験を可能にした。また、 Telesar5[26](図 2.5)はステレオカメラによる視覚情報と触覚情報を組み合わせて遠隔地での細かな手作業を考慮したシステムである。

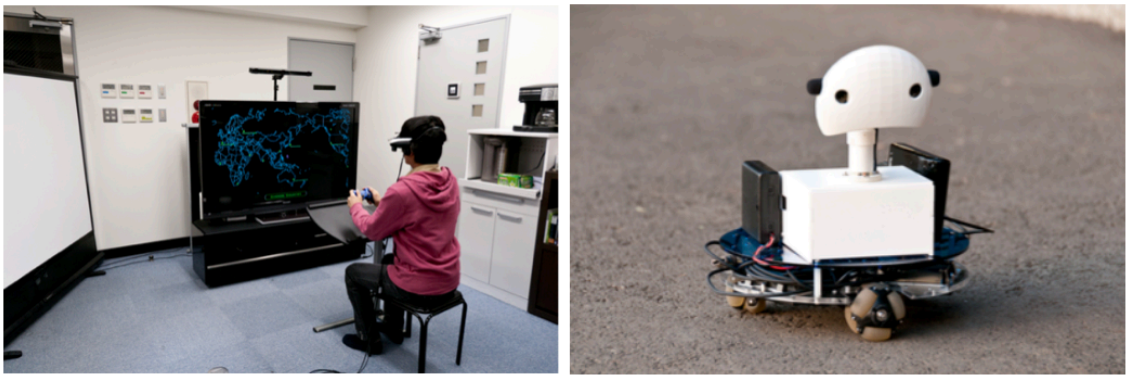

図 2.4 インターネットを介した遠隔没入体験[25]

図 2.5 Telesar5[26]

この他にも、カメラの方向を制御できる回転台に左右の目の距離分だけ話したカメラを設置し、頭の向きに追従させて回転台を制御する手法が多く用いられている[27][28][29] 。この手法では、高解像度の両眼視差を生じた映像を生成できることになるが、左右の映像のキャリブレーションを行う必要がある。また、制御装置が複雑になり、頭部の回転に対して遠隔地のカメラを物理的に回転させる必要があるので、機械的な遅延はさけられない。廣多らの開発したシステムも、頭部の回転から映像提示まで 230～300[ms]程の時間を要しており、遅延を認識できる閾値を超えている。このほかにも、視線誘導自己運動感覚が生じる視野角である 80 度以上の視野角を両眼ステレオカメラで確保することは難しく、実際に使用している HMD の画角も 45 度と、体験者が高い臨場感を感じるに必要な要件を満たしていない。

前述した TWISTER[10]という大型没入ディスプレイを用いた遠隔没入体験システムではこれらの問題を解決するため、ステレオカメラの物理的な制約の解決手段として、複数のステレオカメラを放射状に配置し、あらかじめ広い範囲の映像を生成するという手法を用いている(図 2.6)。しかし、カメラの物理的な制約により、円筒状での空間表示をしなければならないので、実空間生成が難しい。また、複数台のカメラを用いた際に生じるのが各映像のステッチンン

グの問題であり、カメラ画角周辺部での映像の幾何学的な歪みを処理する必要があるため、遠距離でのリアルタイム通信が困難である。前述したシステムもカテゴリー５ｅの LAN ケーブルを使用して有線にて伝送している。

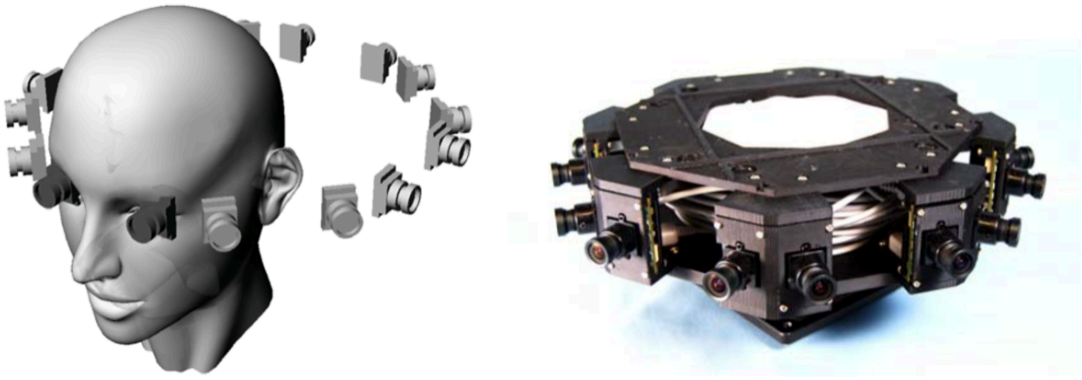

図 2.6 ステレオカメラを複数配置しての高画角撮影[10]
(右)配置イメージ (左)試作カメラ

2.4.2 360 度カメラによる遠隔没入

物理的なカメラの回転を伴わずとも、広い範囲の映像を取得する方法として 360 度カメラを用いた遠隔没入の研究もされている。Hyper Omni Vision[30](図 2.7)は鉛直下向きに設置した葉双曲面ミラーの上面にビデオカメラを設置し、ミラーに映った片側 360 度の風景の鏡像を取得する。取得した映像を UHF 無線にて伝送し、円筒面へ再投影することによってパノラ映像を取得し、HMD に提示する。これによって、実カメラのような時間遅れの問題もなく、遠隔地の風景を自由に見回すことができる。この Hyper Omni Vision を移動モジュールと組み合わせることによってリアルタイムの見回しと移動を実現した[31] 。しかし、筆者が指摘しているように、UHF 無線にて通信しているため、近距離の無線伝送にはほぼリアルタイムで通信できるが、遠隔地での操作を伴うシーンでは時間伝送が無視できなくなり、通信時間と伝送時間による時間遅延を補うための操作支援手法が必要である。さらに、UHF 無線の 1mW 出力時の通信距離は理論上、２.4GHz が 178m、915MHz は 1000m まで通信できるが、現在の日本の電波法では、国内では、868/915MHz 帯のチャンネルは利用できない[34]。

そのため、実際に使用する際は 180m 程度の距離でしか使用できない。これは、本システムの要件におけるグローバルエリアネットワークを介したネットワーク性を満たしていない。また、双曲面ミラーを使用してのパノラマ映像を生成しているため、上方向の映像が取得できておらず、実空間生成が難しい。

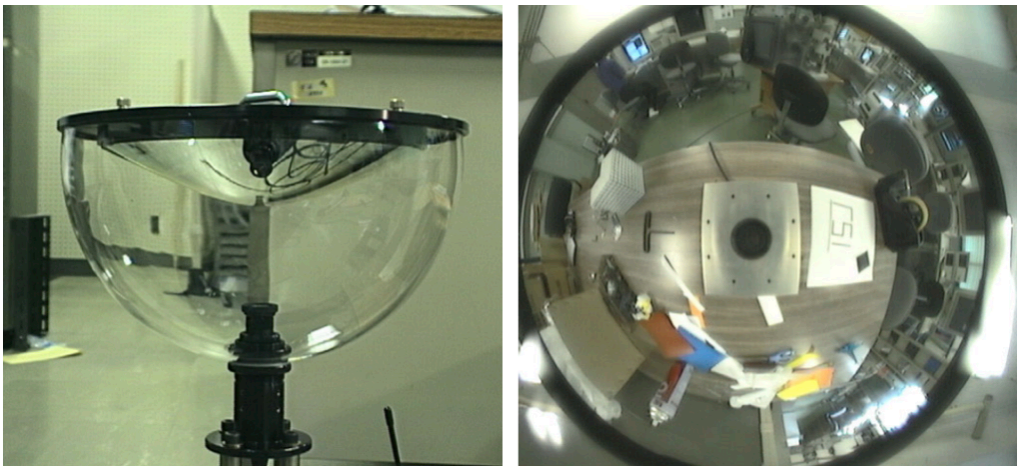

図 2.7 Hyper Omni Vision[30]
(左)外観 (右)入力画像

映像の時間遅れによるリアルタイムの移動を解決する手段として複数台の 360 度カメラから得られた全方位画像から自由視点画像を取得する方法も検討されている[32]。3 つの全方位画像とそれらに対応する 3 つのマスク画像を受信し、自由視点画像を生成する。動的な環境に対応するため、360 度カメラから得られた全方位画像の中から静的領域と動的領域を分離し、合成することによって、自らが移動するだけではなく、歩行者が歩いているシーンなどにも対応する。これから得られた映像を HMD に提示することによって、体験者はリアルタイムの移動ができる。このような複数台のカメラを用いて、自由視点映像を生成するメリットとしては、移動モジュールのように物理的に移動せずとも視点映像を生成できることにある。しかし、その分多くのカメラを配置する必要があり、カメラの台数が増えるに従い処理する領域が増えてしまう。また、塀や壁、棚など空間を遮断する障害物があった際にはその裏側の映像は取得できず、その都度カメラを増やす必要があり、現実的ではない。

2.4.3 本研究の立ち位置

「遠隔地を自由に見る・移動する」というコンセプトの研究は過去、数多くある。前述の要件図を見てみると、先行研究は主に、ステレオカメラを使用する場合は「立体視」「ネットワーク性」「実空間生成」、360 度カメラを使用する場合には「見回しのリアルタイム性」「移動のリアルタイム性」「低違和感」などを対象に研究されてきた。しかし、解像度に関しては前章で述べた通り、現行の最高性能のディスプレイを用いても完璧なシステムを実現することは難しく、使用するデバイス自体も高価なものになってしまうため、本来の目標である「ユーザが気軽に使えるシステム」から離れてしまう。よって、解像度に関しては現在コンシューマ向けに発売されている一般的なデバイスを使用する。また、通信環境についても、従来の大型ディスプレイを使用した際に用いる専用の高速回線を使うのではなく、一般的な環境下に於いての使用を目的としているため、ある程度の時間遅れが生じることはやむをえない。以上より、高解像度と移動によるリアルタイム性を追求することは本研究では目指さず、その他の要件から総合的に、ユーザの主観的な評価にてシステムの有効性を判断する。以上より、遠隔地を自由に見る・移動する為の要件を対象としたシステムを構築する(図 2.8)。

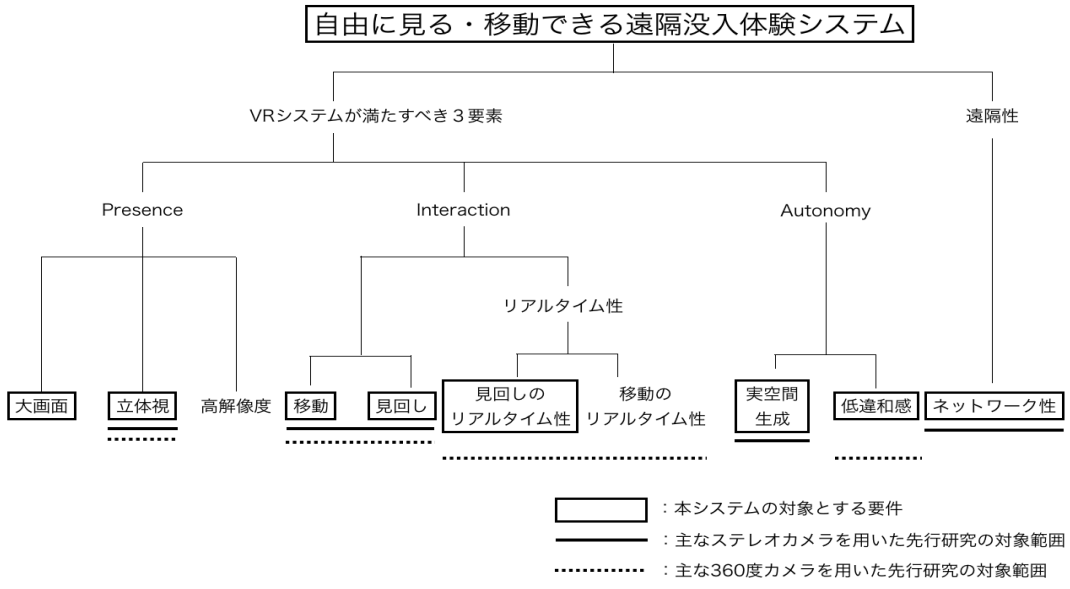

図 2.8 システムの対象とする要件

第3章

システムの構築

3.1 テレイマージョンシステム

前章の要件から、「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システム」を実現するシステムを構築した。構築システムの概要を図 3.1 に、全体のシステム構成図を図 3.2 にそれぞれ示す。システムは遠隔地の 360 度カメラから取得した映像を HMD に提示するための遠隔映像提示サブシステムと、キーボードからの指令を移動モジュールに伝え、移動する遠隔移動サブシステムで構成されている。遠隔映像提示サブシステムと遠隔移動サブシステム間の情報のやり取りはなく、遠隔地にある移動モジュールの上にカメラが物理的に設置してある(図 3.3)。

体験者は HMD を装着し、遠隔地に設置してあるカメラから送られた映像を自由に見回しながら見ることで、高い没入感を得ることができる。同時に、キーボード操作によって移動モジュールを操作することで、自由に移動することができる。

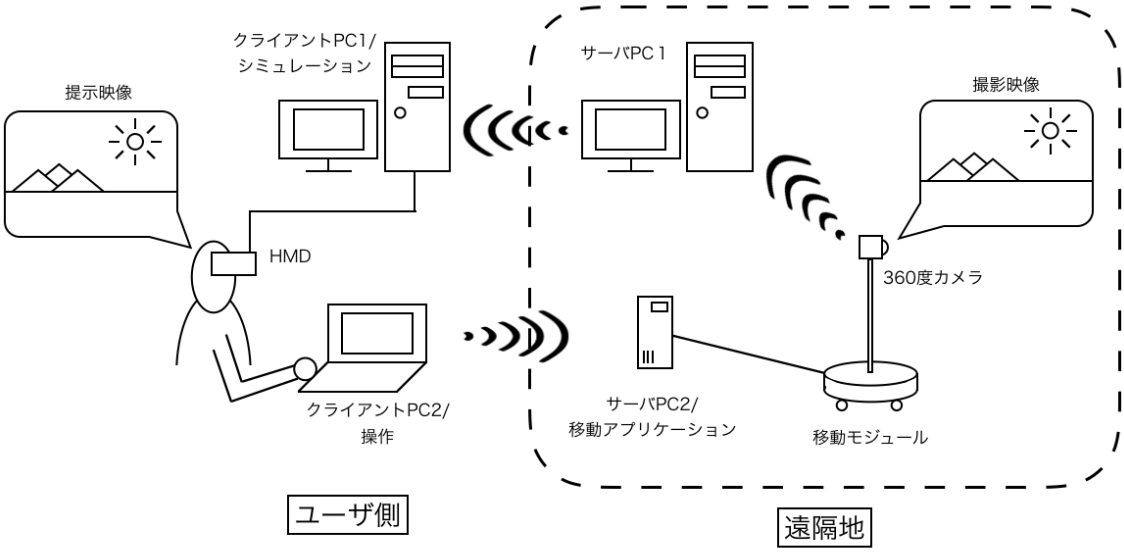

図 3.1 構築システムの概要

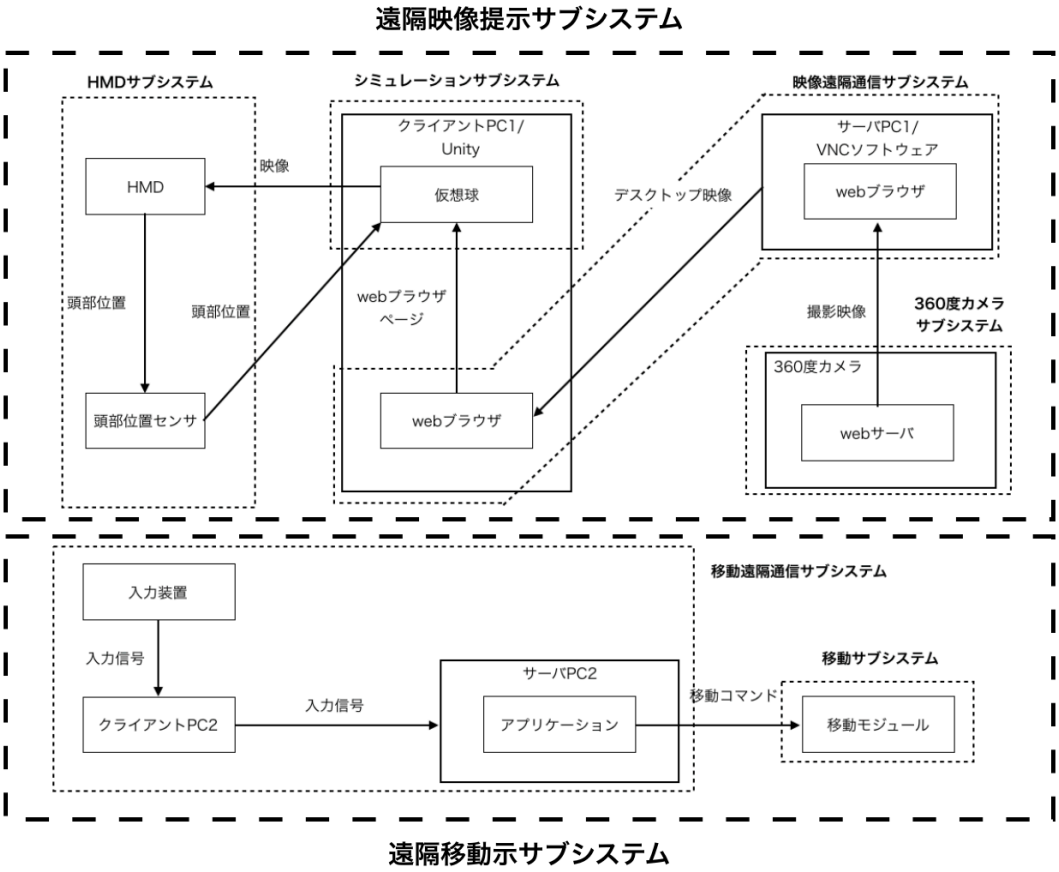

図 3.2 システム構成図

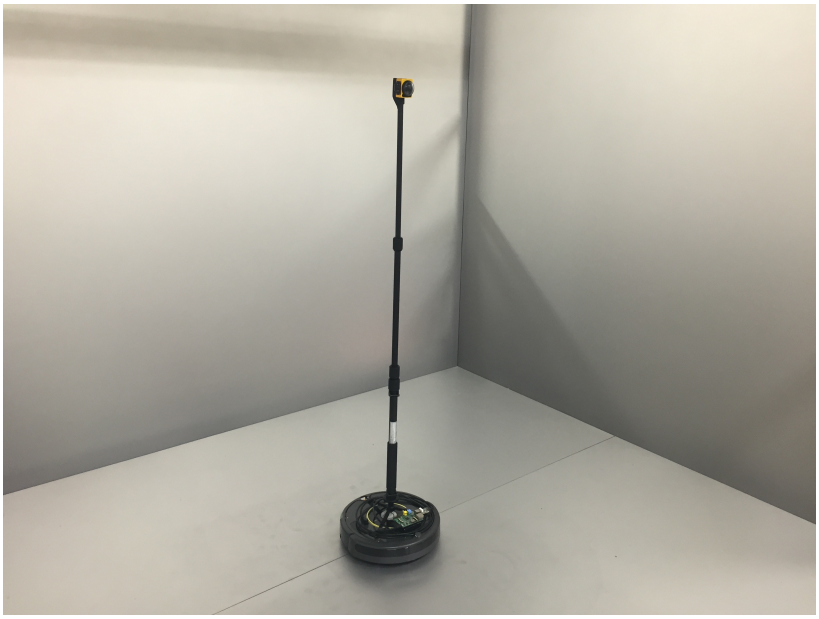

図 3.3 遠隔システム外観

3.2 遠隔映像提示サブシステム

遠隔地の映像を臨場感のある形で HMD に表示するために、遠隔映像提示サブシステムを構築した。システムは、210 度以上の視野角を撮影する為に 360 度カメラを用いて撮影した映像をリモートデスクトップにて遠隔地に提示し、Unity 上で、HMD に提示するにあたって自然な形に変換した後、HMD に映像を提示する。360 度カメラ自体はローカルで現地の PC に接続されており、PC がグリーバルエリアネットワークを介して映像を送信するというような流れをとっている。

3.2.1 360 度カメラとその利点

360 度カメラは 1 つまたは複数のカメラで周囲の映像を一度に撮影できる。そのため、ステレオカメラのように観測視野がレンズの画角により制限されることはない。これまでに幾つかの 360 度カメラが提案されており、それぞれの方式を以下に示す。

●カメラ自体を回転させる方法

1 台のカメラを回転させるとで、全方位のパノラマ映像を取得する方式を得る。近年では、スマートフォンのアプリでも一つのカメラを回転させてパノラマ映像を生成するものもある。このような方式は、解像度の高い映像を取得できるが、1 シーンの撮影に時間を要するため、動的な環境や、リアルタイム映像を撮影するには不向きである。

●魚眼レンズを用いた方法

一つのカメラに対し、魚眼レンズを用いて光学的に撮影画角を広げる方式である。レンズを通して映像を撮影するため、解像度が低くなりやすく、画像の中心から端に行くにつれて歪みが大きくなるため、補正が必要である。Kodak 社の SP360 などがこれにあたる。

●ミラーを用いた方法

鉛直下向きに設置された球面ミラーや円錐ミラーを鉛直上向きに設置したカメラでミラーに写った景色を撮影することにより、360 度のパノラマ映像を取得する。魚眼レンズと同じく、解像度が低くなりやすく、画像中心近傍につれて歪みが大きくなる。また、上面にレンズまたはカメラを設置しているため、上下方向の情報を取得できない。前述した Hyper Omni Vision や、映蔵社の SOIOS55 がこれにあたる。

●複数のカメラを用いた方法

2 個以上のカメラを用いて撮影した映像から 360 度の映像を取得する。比較的高い解像度の映像を得られるが、複数のカメラで撮影する場合、それぞれカメラから取得した画像をつなぎ合わせるためのステッチング処理を施す必要があり、リアルタイム補正が難しい。同時に、各映像のつなぎ目に歪みが生じやすい。PointGreyResearch 社の Lady bug2 や Woodman Labs 社の Go pro を複数台つなぎ合わせたのもが知られている。

360 度の映像を取得する方法については大きく分けて、高い解像度で撮影できるが、リアルタイムでの撮影ができないものと、解像度は高くはないが、リアルタイムでの映像の取得が可能なものに分類される。(図 3.4)

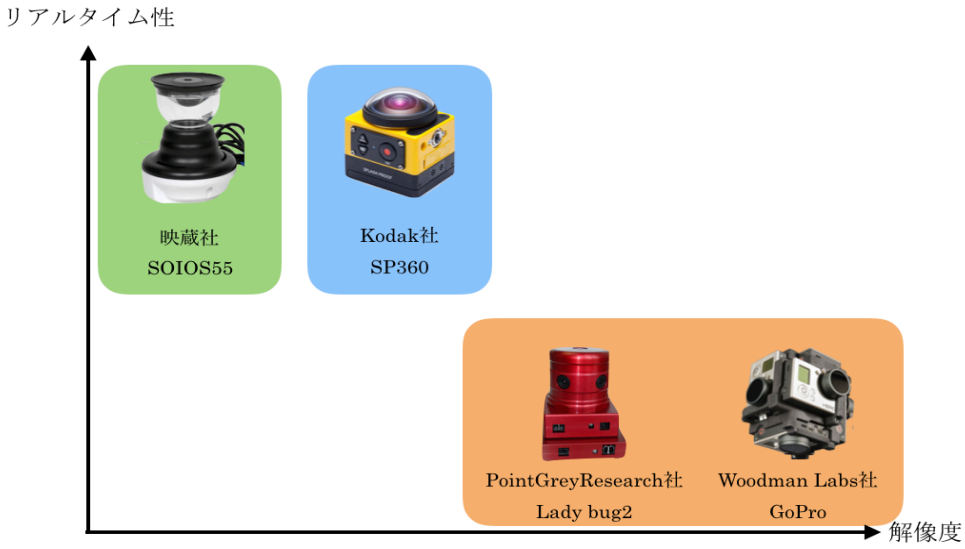

図 3.4 各 360 度カメラの特性

カメラサブシステムが持つ機能要求は、210 度以上の視野角での撮影と、カメラの無線化である。以上の要件を満たすため、以下のような 360 度カメラシステムを構築した。視野角を確保するためには、上記のうち、どのような撮影方式を採用するかで変わってくるが、リアルタイムでの無線通信・必要な撮影範囲を考慮して魚眼レンズ方式を用いた Kodak 社の SP360 を採用した(図 3.5)(表 3.1)。Wi-Fi 通信の受信部には Planex 社 GW-300S KATANA を使用した。両者の通信規格は 11n/g/b である。撮影された映像は、カメラ内の web サーバから Wi-Fi 子機を通してローカルエリア接続されたクライアント PC の web ブラウザ上に表示される(図 3.6)。web ブラウザ上に表示される映像の解像度は 1024×960 である。

図 3.5 SP360

表 3.1 SP360 の性能

記録画素数	1920×1080
フレームレート	30 fps
撮影画角	360×214 度
撮影範囲	50 cm～
Wi-Fi 通信規格	802.11 n/g/b

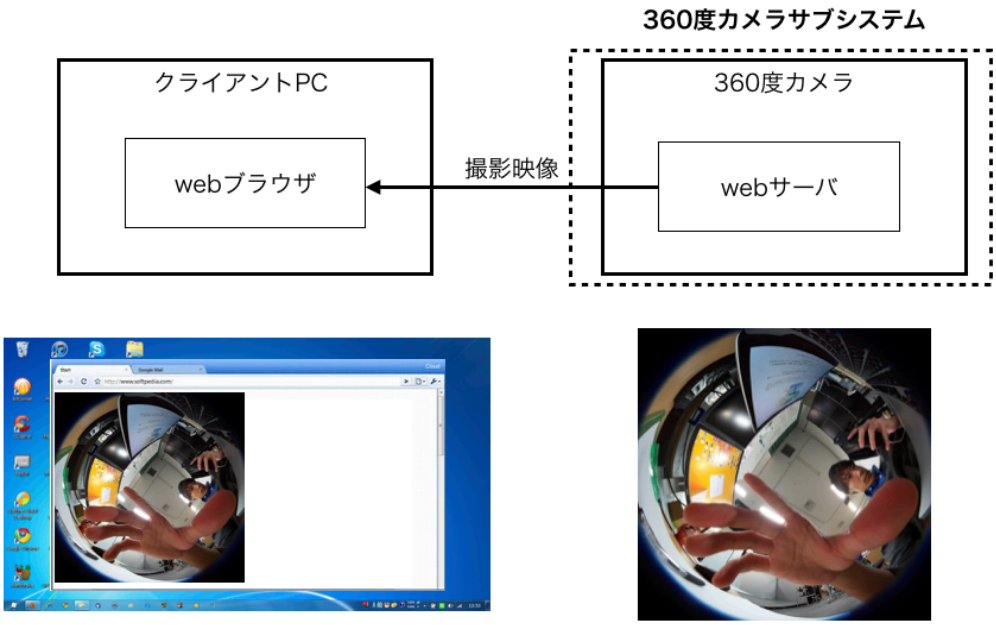

図 3.6 360 度カメラサブシステム構成図

3.2.2 インターネットを介しての遠隔通信

両者をリアルタイムで通信するために、本システムはカメラからの映像を取得するサーバ PC と提示された映像をリアルタイムで処理し、HMD に提示するためのクライアント PC で構築されている。両者を繋ぐために、サーバ PC のデスクトップ映像を VNC ソフトウェアからリモートデスクトップ接続されたクライアント PC 側の web ブラウザに送信するという処理を行っている。これによって、体験者はグローバルエリアネットワーク接続された遠隔地のサーバ PC のデスクトップ映像をリアルタイムで見ることができる。表 3.2、3.4 に使用したサーバ PC、クライアント PC を示す。尚、カメラから撮影された映像をサーバ PC に送信し、クライアント PC を通して HMD に提示されるまで、平均 0.97 [s]の時間遅れが見られた。映像のフレームレートは平均 8 [fps]程度である。

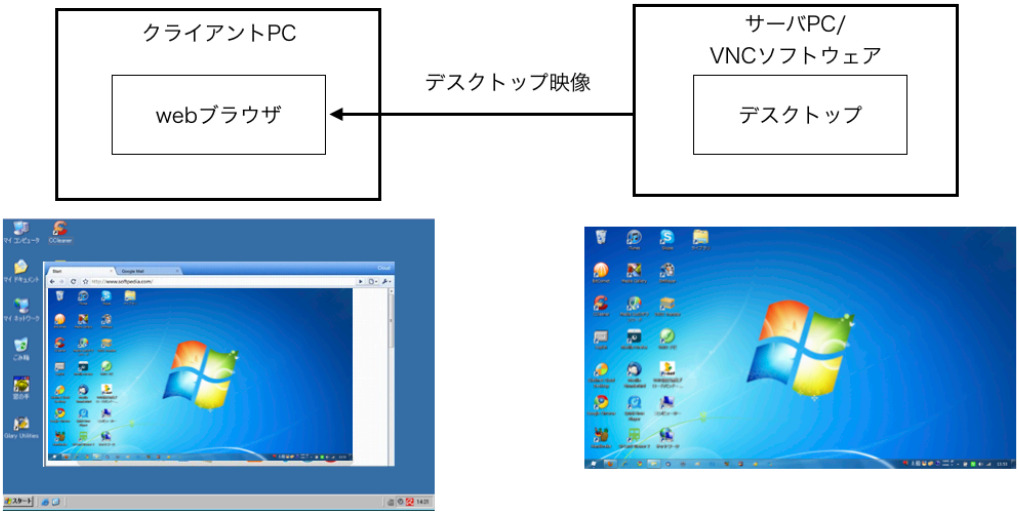

図 3.7 映像遠隔通信サブシステム

表 3.2 サーバ PC の性能

オペレーティングシステム	Windows7 Pro 64bit
プロセッサ	Intel Core i7 CPU 920@ 2.67GHz
メモリ	9.00GB
グラフィックカード	NVIDIA GeForce GTS 250

3.2.3 実空間での情報提示とリアルタイムでの情報表示

360 度カメラから取得した映像からの画像を、任意形状のディスプレイ・スクリーン面に貼り付け、透視投影画像を取得するため、シミュレーションシステムを構築した。前述したカメラから送られてくる画像は以下のような魚眼映像である(図 3.8)。それを、体験者が HMD を通して見た際により実空間状に近い形で提示するために、Unity での仮想空間上に設置した球体モデルの表面内側に貼り付けることによって仮想ドームとして再生した(図 3.9)。体験者は、仮想球面スクリーンに表示された映像を HMD で見ることになる。使用する PC の構成は以下の通りである(表 3.3)。

図 3.8 360 度カメラでの撮影画像

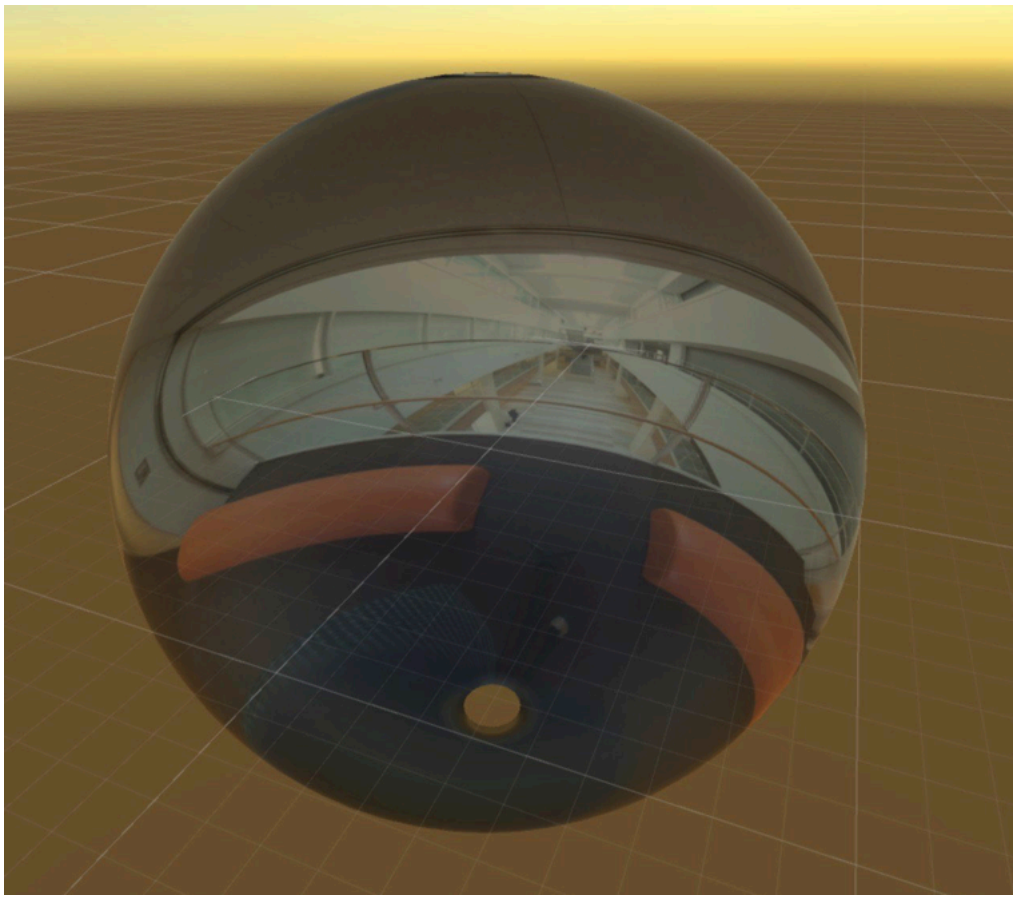

図 3.9 仮想球体への画像貼り付け

表 3.4 クライアント/シミュレーション PC の性能

オペレーティングシステム	Windows 8.1 Pro 64bit
プロセッサ	Intel Xeon CPU E5-1630 v3@ 3.70GHz
メモリ	16.0 GB
グラフィックカード	NVIDIA Quadro K4200

360 度カメラから送られてくる映像をリアルタイムで仮想空間内の球体モデルに貼り付ける必要がある。サーバ PC のデスクトップ映像は VNC ソフトウェアからリモートデスクトップ接続されたクライアント PC 側の web ブラウザに送信される。Unity 上の仮想球体に貼り付けるために、 HTML の IU プラグインを用いて仮想球面上で web ブラウザを立ち上げ、サーバ PC の IP アドレスを参照することで、サーバ PC 側のリアルタイムのデスクトップ画像を表示した。

使用エンジンはサーバ PC 側で、カメラからの映像を web ブラウザに表示することで、Unity の仮想球体表面にリアルタイムの 360 度映像を提示することができる。取得した映像について、撮影した画角が球体内側に貼り付ける際に同じ画角になる位置に来るよう Unity 側の表示範囲を調整することで、210 度以上の視野角を持った映像を提示する。

3.2.4 HMD とその利点

VR システムのうち、出力システムが満たすべき機能要求は、臨場感を生み出すための広い画角と見回しのリアルタイム性を生むヘッドトラッキング機能である。必要な画角については Vection が発生する 80 度以上の画角を持つディスプレイを用いる必要が有る。

HMD は、体験者に高い没入感を生み出すことが可能なデバイスであり、前章で説明した通り、HMD を用いた遠隔没入の研究も多くされている。簡単に、HMD の特徴を説明する。HMD は体験者の頭部に装着するディスプレイ装置であり、目の前をディスプレイで覆うことによって高い没入感を実現する。一方で、ディスプレイが目の前にあるので、解像度の高いディスプレイが求められる。HMD はシースルーの透過型ディスプレイと非透過型の没入型ディスプレイに大別できるが、本研究で用いるものは後者の没入型ディスプレイである。特に、近年では画角が 100 度程度の広い画角を持つ HMD が登場したことによって、従来の HMD よりも高い没入感を味わうことができる。本研究では、画角が 80 度以上、ヘッドトラッキング機能の搭載を備えている HMD として Oculus VR 社の Oculus rift DK2 を使用する。以下に、使用する機材と HMD のシステムの構成図を示す。(図 3.10)(図 3.11)(表 3.5)

Oculus rift DK2 は主に、体験者に映像を提示するディスプレイ部と頭の位置を把握するトラッキングセンサ部の 2 つのパーツから成り立っている。HMD の位置を検出したトラッキングセンサは映像を処理する PC(シミュレーションシステム)に検出情報を送り、それに基づいて適切な映像を HMD に提示する。体験者が頭部を旋回させてから HMD に提示させるまでの時間遅れは平均 90 [ms] であった。これは、頭部の時間遅れの閾値である 200 [ms]を下回っており、要求機能を満たしていると言える。

図 3.10 Oculus Rift DK2

表 3.5 Oculus Rift DK2 の性能

解像度	1920×1080 (片目あたり 960×1080)
パネル方式	有機 EL ディスプレイ
視野角	90 – 110 度
リフレッシュレート	75 Hz
焦点距離	1.3 m

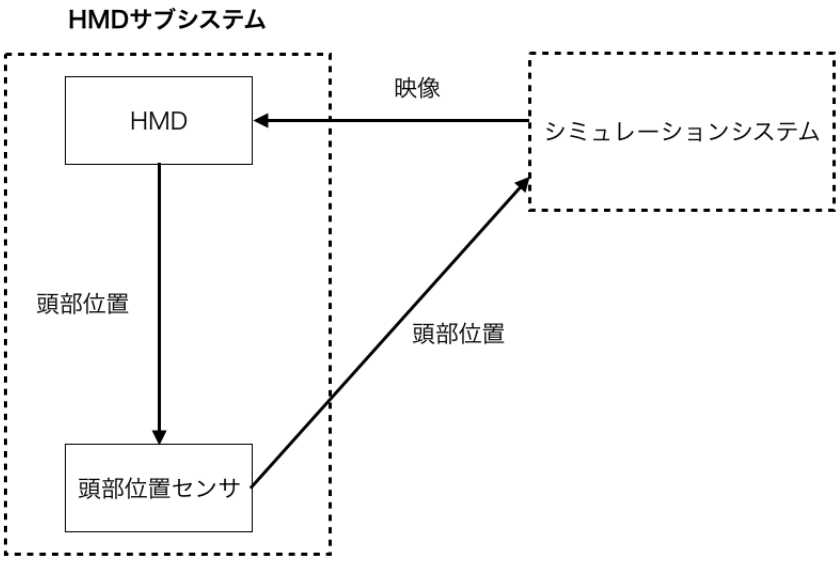

図 3.11 HMD サブシステム構成図

3.3 距離感の評価実験

仮想球に映像を提示する際に問題となるのが、仮想球の大きさである。本システムでは、実空間性を高めるために、Unity 上に生成された擬似的な球体の内側にパノラマ映像を張り付けることで、360 度全周囲映像を作成している。この際、360 度映像自体はモノラルで撮影されているが、HMD 上では仮想球面スクリーンに対して両眼視差を用いた映像が提示される。また Oculus Rift の光学系は焦点距離が約 1.3m に設定されている。そのため、利用者にとっては、撮影映像の距離に対して、目の焦点調節、両眼視差、輻輳がそれぞれ矛盾した映像を提示することになる。

特に、360 度全周囲映像を作成する際の、仮想球面の大きさについての具体的な指標についてはあまり議論されていない。そのため、提示される映像コンテンツによっては、「映像による圧迫感を感じる」等の意見を得られることがある。そこで、本論文では仮想球面の半径を変えることで、両眼視差や輻輳の変化が、ユーザが感じる映像の距離感にどのような影響を及ぼすのかを実験により検証した。

3.3.1 実験環境

Oculus VR 社の Oculus Rift DK2 を使用し、360 度の実写ビデオ映像で構成される映像空間を体験する没入型システムを構築した(図 3.11)。360 度映像空間の生成には、Woodman Labs 社の GoPro HERO3 を Freedom360 Mount を用いて立方体状に 6 台配置したカメラを使用して撮影した。この 6 つの映像から、ステッチング処理によりパノラマ映像を作成し、Unity 上に生成された擬似的な球体の内側にパノラマ映像を張り付けることで、360 度全周囲映像を作成した。映像の解像度は SP360 と同じ 1920×1080 である。

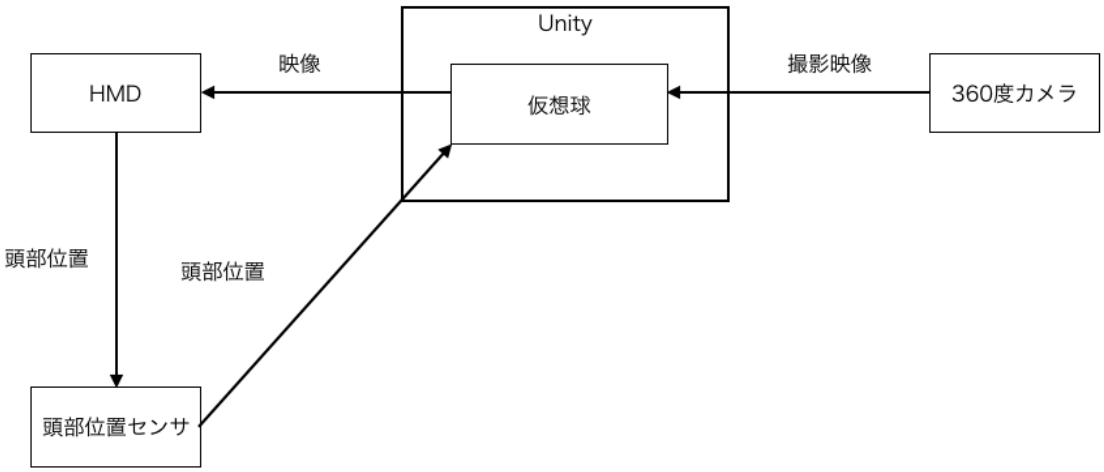

図 3.11　実験システム図

3.3.2 実験方法

Unity 上の仮想球体の半径を、それぞれ 0.7m、1m、2m、10m、100m と変化させ、この際に被験者が感じる対象映像への距離感の違いを測定した。映像に関しては屋内の風景と屋外の風景の 2 種類の映像を用意した(図 3.12)。被験者には各映像をランダムに見せ、指示された対象まで何 m に感じるかを数値で回答させた。屋内の映像に関しては、前方に置かれたパネルまでの距離を、屋外の映像に関しては、前方に見える橋までの距離を回答させた。それぞれの実距離は 2m、120m である。実験は 20 代の男性 10 人の被験者を対象に行なった。

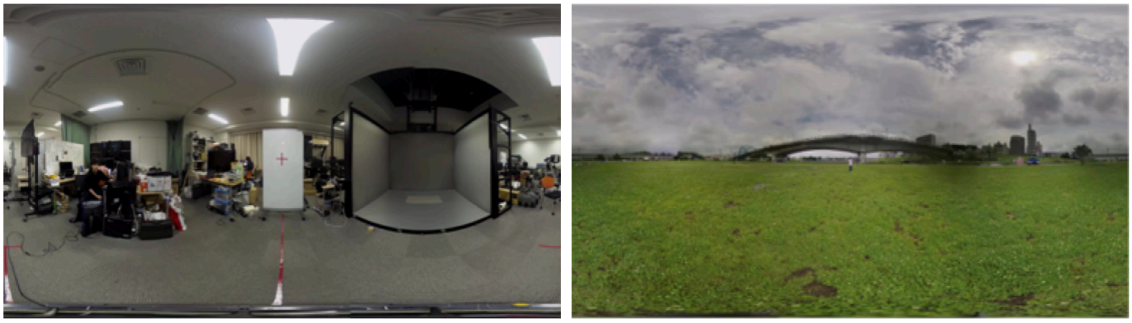

図 3.12　被験者への提示映像：(左)屋内映像 (右)屋外映像

3.3.3 結果・考察

実験結果については、映像毎に被験者 10 人の回答について、被検者・スクリーン半径を因子とした分散分析を行った。各映像とも、それぞれ被験者間の回答には大きな個人差が見られた。これは被験者が感じる映像に関しては個人の経験則に基づいて回答しているため、それぞれの回答結果に大きなズレが存在したものと思われる。スクリーン半径の変化に関しては、屋内映像については 5%有意（p=0.020）であった。これは、屋内映像の 360 度映像を提示した際に、スクリーンの半径が、被験者が感じる距離感に影響を及ぼしていることを表している。屋外映像について、スクリーン半径を変えた際に有意確率 p=0.089 であり、5%有意ではなかったが、スクリーン距離が距離感に影響を及ぼしていることは示唆された。2 つの映像に関してこのような違いが見られたことに関しては、HMD の焦点距離が一定の為、遠距離での遠近感覚が掴みにくいことに起因したものと思われる。

図 に屋内映像と屋外映像に対する回答の平均値と標準偏差をそれぞれ示す。どちらも、スクリーン距離が映像対象までの距離に近いほど、認識される距離感が実際の距離に近くなるが、スクリーン距離が大き過ぎる場合や小さ過ぎる場合は、実距離との誤差が大きくなる傾向が見られた。屋内映像の場合は半径 1m～2m、屋外映像の場合は 10m～100m で実距離に近い値が得られた。これらの結果から HMD で実映像を表示する際に、カメラとスクリーンの位置に適正距離があることを表している。

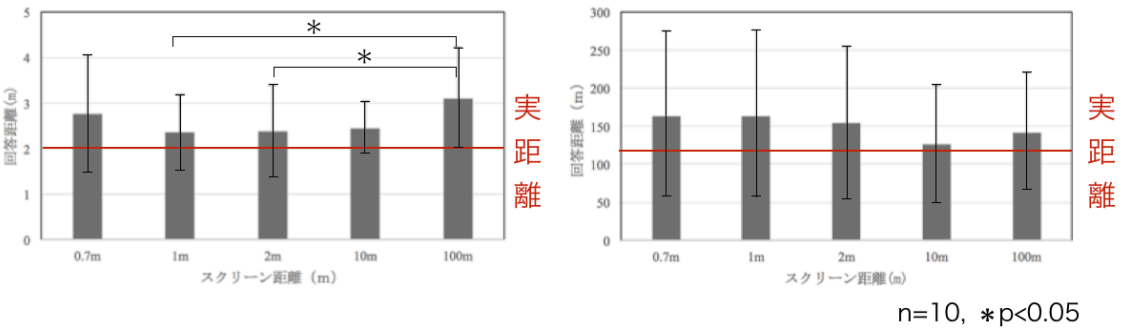

図 3.13　回答の平均と標準偏差：(左)屋内映像 (右)屋外映像

以上の結果より、HMD を用いて 360 度の全周囲映像を作成する場合、屋内

映像を提示する際は、見せたい対象までの実距離に近く設定する。屋外映像を提示する際は、10m 以上では回答に影響が少ないので、10m 以上に設定することで適切な遠近感を得られることがわかった。

3.4 遠隔移動サブシステム

構築した遠隔移動サブシステムを図 3.14 に示す。移動サブシステムが満たすべき要件としては、移動と遠隔通信である。まず、移動であるが、本システムで構築した映像提示システムはカメラの撮影画角の制約上、全面 210 度程度の視野角しか確保できない。そのため、体験者が首を動かすだけではなく、体を後ろに向けた場合は映像が提示されていない可能性が考えられる。よって、体験者が「体を後ろに向ける」という動作に対応するために、移動モジュールは旋回性を備えている必要がある。また、移動モジュールの上に 360 度カメラを物理的に設置する必要があるため、ある程度の安定性が求められる。以上の条件から、移動モジュールには、iRobot 社の Create2 を使用した(図 3.15)。

遠隔通信の要件を満たすために、遠隔地の移動モジュールを動かすアプリケーションをリモートデスクトップ接続して操作する移動遠隔通信サブシステムを構築した。サーバ立ち上げとアプリケーションの起動には、Raspberry pi Model B を使用した(表 3.5)。Create2 と Raspberry pi を USB ケーブルにて有線接続している。通信部には、11n/g/b 規格の PLAEX 社の GW-USNANO2A[11] を使用し、無線 LAN 接続している。無線 LAN にてサーバ PC と遠隔地のクライアント PC をリモートデスクトップ接続することで､キーボードから入力された指令を遠隔地の移動アプリケーションへ送信し、移動モジュールを操作する。操作はキーボードの方向キーで行い、それぞれ、⬆ - 前進、⬇ - 後退、➡ - 右旋回、⬅ - 左旋回に対応している。移動速度は 500 [mm/s]で一定である。

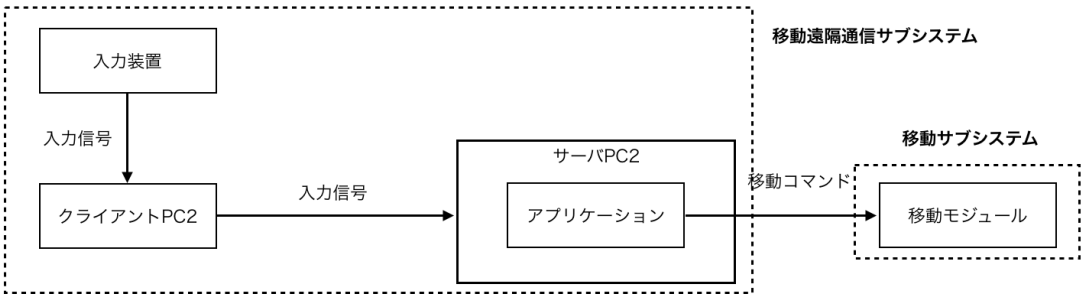

図 3.14　遠隔移動サブシステム構成図

図 3.15　Create2

表 3.5　Raspberry pi model B の性能

オペレーティングシステム	Raspbian
プロセッサ	ARM1176JZF-S
メモリ	512 MB
グラフィックカード	250 MHz / Broadcom VideoCore IV

以上より、「自由に見る・移動出来る遠隔没入体験」の要求から導き出された機能要求を満たしたシステムを構築した。要求から出された機能要求に対し、それぞれのサブシステムに割り当てたものを図 3.16 に示す。

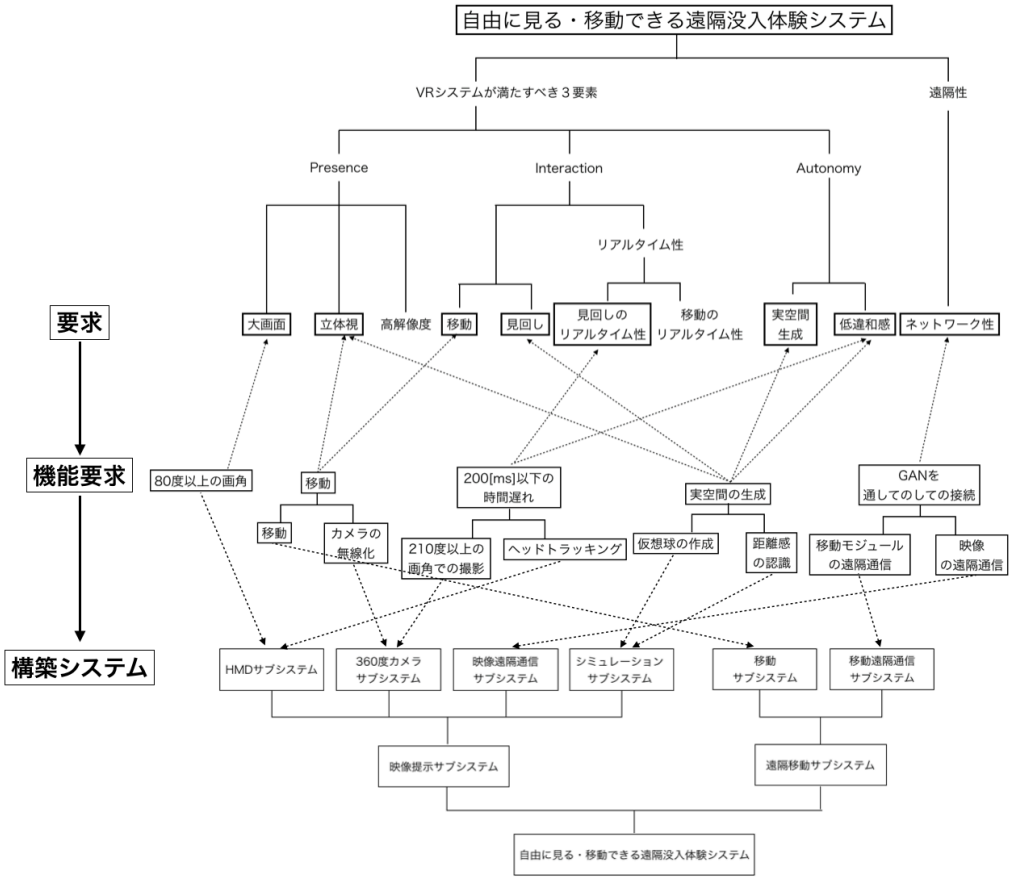

図 3.16 要求–機能要求–システム間の関係図

第4章

システムの評価

4.1 システムの検証方法

本研究の目的として設定した「自由に見る・移動できる遠隔没入システム」の機能要求を全て満たしたシステムの開発が完了した。そこで、構築したシステムが「自由に見る・移動できる遠隔没入システム」になっているのかの検証を行うために、定量的な評価のため、2 つの実験を行った。また、定性的な指標としてアンケートによる調査を行った。

本研究では、体験者がシステムを通して遠隔地を自分の行きたい場所に行けるかつ、その場にいるような感覚で自由に見回すことができることを目標としている。それにあたって、以下の２点を満たすことが重要になってくる。

①自分が行きたい場所に正確に移動できるか。
②空間の位置関係を実空間における人間と同じように把握できるか。

この２つについて、実空間における人間を基準とした時と違いがないのであれば、本システムは「自由に見る・移動する」を可能とするシステムだと言える。以上の 2 点を満たすための実験を行うことによって、各動作の正確性を全体のパフォーマンスとして評価する。①にあたっては、「見回し」が移動の正確性に与える影響を評価するために、HMD と既存のディスプレイモニタでコース上を移動した場合のズレを検証した。②については、空間の位置を把握する際に、「移動」と「見回し」が及ぼす影響を評価するために、HMD とモニタを用いてそれぞれ移動を行った場合とそうでない場合での空間把握のズレを検証した。

また、「没入感」や酔いなどの「違和感」は、アンケートによる定性的な評価を行うことによって評価した。

4.2　「見回し」が移動に及ぼす影響の評価実験

「自分が行きたい場所へ正確に移動できるか」を検証するために、本システムの「見回し」が移動の正確性にどのような影響を与えるのかを評価した。

4.2.1 実験方法

全長5mの以下のようなコース(図4.1)を用意し、被験者にコースの赤線に沿ってシステムを操作してもらう。HMDをかぶり、自由に見回しができる場合と、モニタで表示範囲が固定されている場合を想定した2種類の方法で実験を行った。モニタの表示範囲に関しては、被験者にHMDを装着して正面を向いてもらった位置で画面を固定した。カメラの高さはそれぞれ被検者の座高程度に設定した。それぞれの提示画面を図4.2に示す。実験は20～50代の男性10人の被験者を対象に行なった。被験者には操作に慣れてもらうために、練習としてHMDとモニタの両方で実際のコース上を移動してもらってから実験を行った。

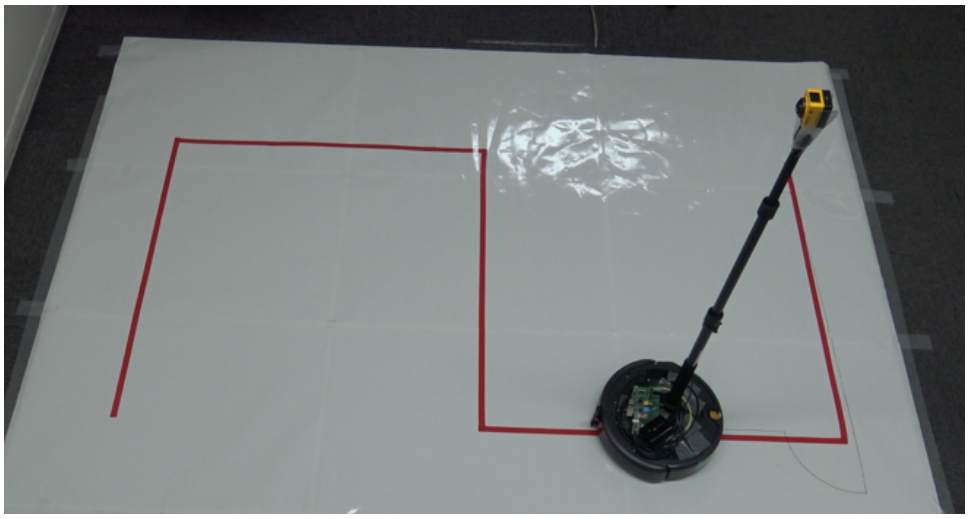

図 4.1 実験コース

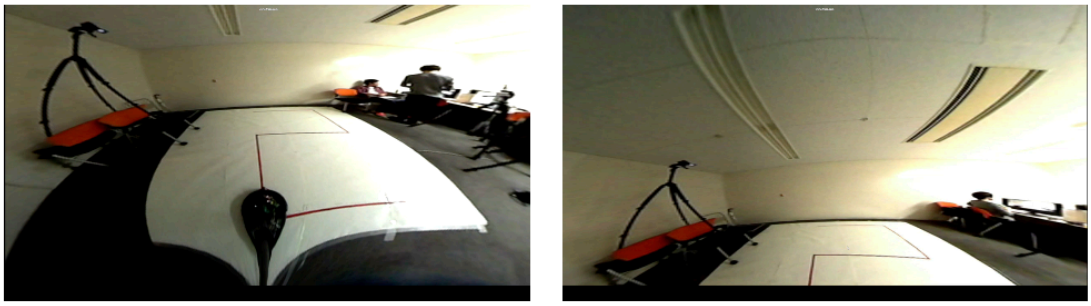

図 4.2 被験者への提示画面：(左)HMD (右)ディスプレイ

移動結果の解析に関しては、移動モジュールの先端にマーカーを付け、移動時の経路を記録する。その際の移動経路から移動モジュールの中心の経路を割り出し、中心の移動経路と実際のコースとのズレの面積を移動時の誤差として評価した。

4.2.2 結果・考察

それぞれのズレ面積と標準偏差を図 4.3 に示す。HMD でのズレ面積の平均値は 274 [㎠]、モニタでのズレ面積の平均値は 2592 [㎠]であった。それぞれの結果について t 検定を行ったところ、有意確率 p=0.000 であり、1%の有意差が見られた。

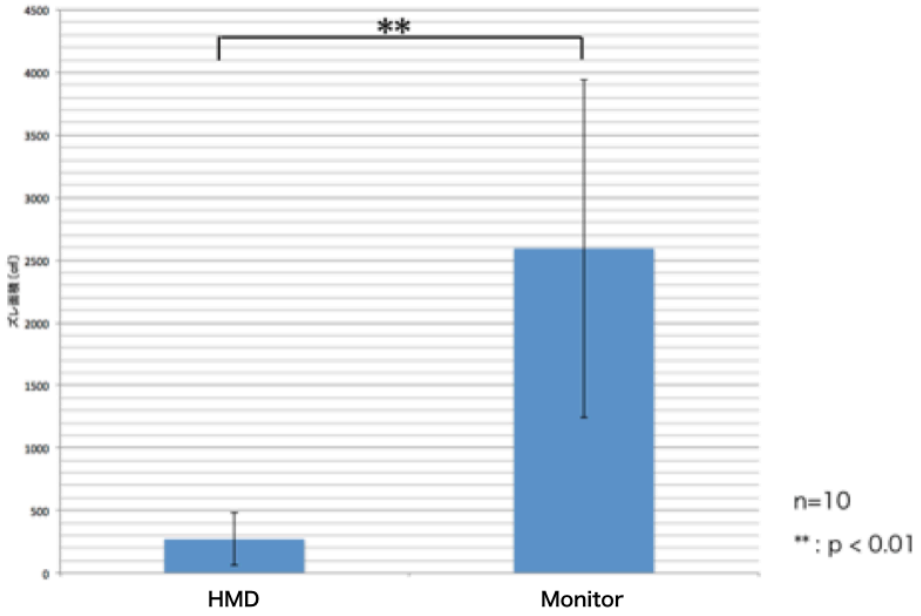

図 4.3 ズレ面積の平均値と標準偏差

以上の結果から、移動する際に、正確に移動するには HMD による自由な見回しが有効であると言える。HMD を装着した際の被験者の視線に関しては、直線移動時には下を向いて移動経路を確認し、コースの角を曲がる際に横を見回し、次の移動経路の位置を確認するなどの傾向が見られた。モニタでの移動時には、直線移動時には画面の旋回などはほぼ見られず、起動修正をする際に調整する程度であった。また、コースの角を曲がる際に、一度、画面を旋回させてから次のコースを確認するなどの傾向が見られた。これは、360 度カメラと仮想球によって視野全体を表示する実空間を提示したことにより、「自分の位置を確認しながら操作する」ことを可能にしたことが起因していると思われる。

4.3 「移動」と「見回し」が空間把握能力に及ぼす影響の評価実験

「空間の位置関係を実際の人間と同じように把握できるか」を検証するために、空間を実際の人間と同じように把握するために、「移動」と「見回し」が及ぼす影響を検証した。

4.3.1 実験方法

両脇(A 面・B 面)に縦 2.67m、横 6.73m の壁が配置してある部屋に、16 種類の記号をランダムに貼り付けた(図 4.4)。被験者は、その中から、指定された記号を探し出す。指定された記号が見つかったら、　壁が縮尺された回答シートに回答記号の位置を記録してもらう。実験は、20～50 代の男性 10 人の被験者を対象に行なった。記号の種類は『●➡⬅⬆⬇■▶◀▲▼★◆♠◉♣♥』であり、ヒラギノ角ゴ ProN で出力した。記号の大きさはそれぞれ 600p である。記号は 1 つの壁に 8 種類をランダムに配置した。設置位置については、被験者がシステムを操作した際に、ほぼ一目で判断がつく距離(近)、おおよそ判断がつく距離(中)、判断がつきにくい距離(遠)にそれぞれを配置した(図 4.5)。その中からランダムで選定した記号を被験者に指示した。被験者には、一度実際に部屋に赴いてもらい、部屋を確認してもらう。その後、部屋を移動し、HMD をかぶり、自由に見回しができる場合と、モニタで表示範囲が固定されている場合について実験する。その際、システムを操作して、自由に移動ができる場合と、場所を固定して移動ができない場合をそれぞれのディスプレイ装置で行った。システムを設置する位置であるが、「ディスプレイ時に移動をしなくとも全ての記号がカメラの画角内に収まる位置」として、壁からそれぞれ 1m、1.18m 離れた場所に設置した。実験開始位置でのカメラの取得画像と、ディプレイの被験者への提示画像を図 4.6 に示す。実験は、それぞれのパターンについて 2 回ずつ行った。実験には、データとして記録位置と回答時間を収集した。

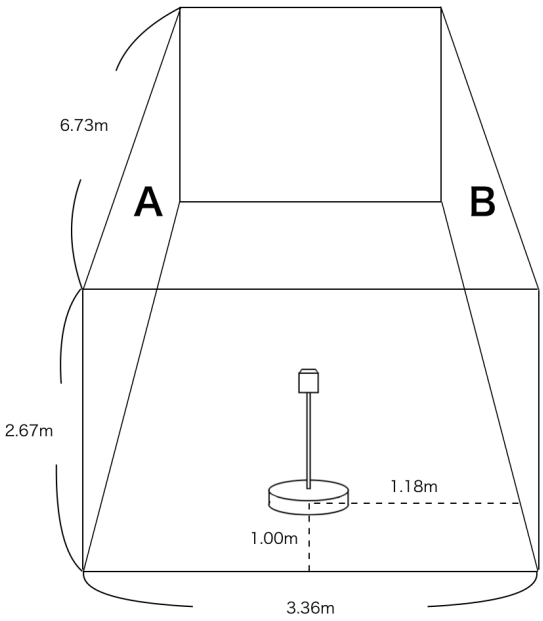

図 4.4 実験環境のイメージ図

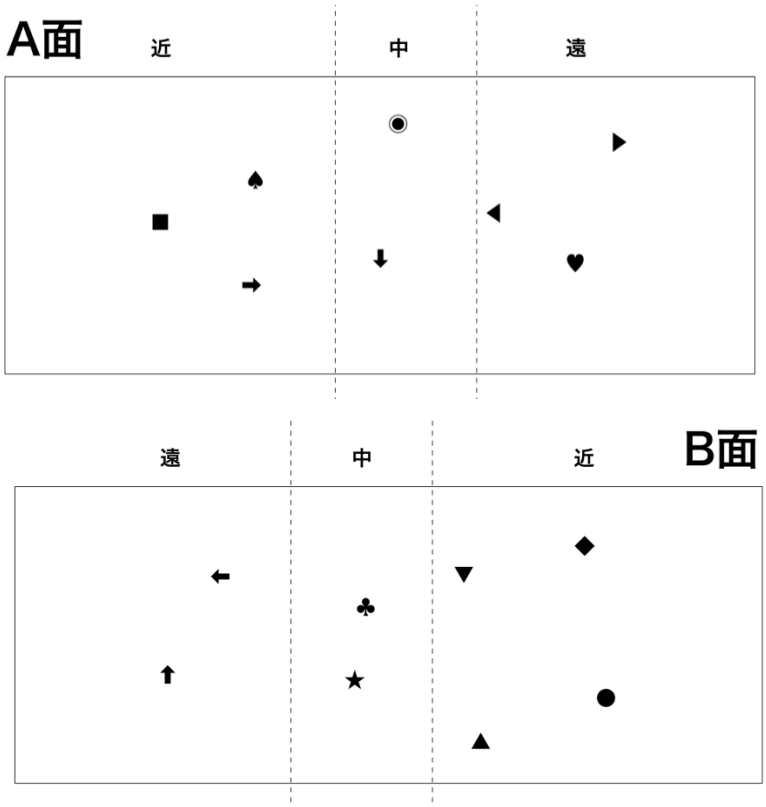

図 4.5 記号の設置位置

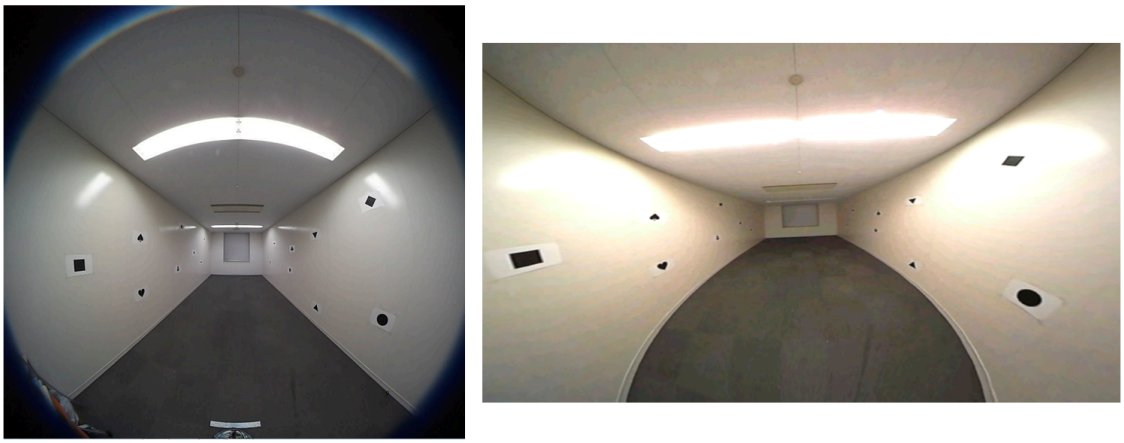

図 4.6 (左)カメラの取得映像 (右)ディスプレイでの提示映像

4.3.2 結果・考察

被験者に出題したマーカーの位置(近・中・遠)を表 4.1 に示す。HMD/移動なし、Monitor/移動なしの実験時、遠・中距離を出題した場合について、「マーカーを判断できない」との回答が幾つか得られた。その場合の回答については、「判断がつかないマーカーの中から答えをランダムで選ぶ」と仮定し、誤差距離の期待値を求めた。

表 4.1 被験者への出題位置

1回目 (mm)	被験者1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
人	中	中	中	近	中	中	近	中	近	遠
HMD/移動あり	遠	近	近	遠	近	遠	近	遠	近	遠
HMD/移動なし	近	中	近	遠	遠	近	中	近	遠	近
D/移動あり	近	近	遠	中	近	近	近	近	近	近
D/移動なし	遠	遠	中	近	中	遠	中	近	中	遠

2回目 (mm)	被験者1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
人	近	近	近	中	近	中	遠	近	近	中
HMD/移動あり	中	遠	近	近	近	近	近	近	近	遠
HMD/移動なし	中	遠	遠	中	近	遠	近	遠	近	中
D/移動あり	遠	近	中	近	遠	遠	遠	遠	中	中
D/移動なし	中	中	近	遠	遠	近	中	近	遠	中

赤=回答なし

図 4.7 に各項目の回答誤差距離の平均と、標準偏差を示す。各項目に一元配置分散分析と多重比較を行った結果、図中の項目間で有意差が見られた。さらに、「ディスプレイの違い」「移動の有無」「被験者」について、２元配置分散分析を行ったところ、「ディスプレイ」については p=0.019 と 5%の有意差が、「移動」については p=0.00 と 1%の有意差が、「ディスプレイ*移動」については p=0.010 と 5%の有意差がそれぞれ見られた。「被験者」については、有意差は認められなかった。

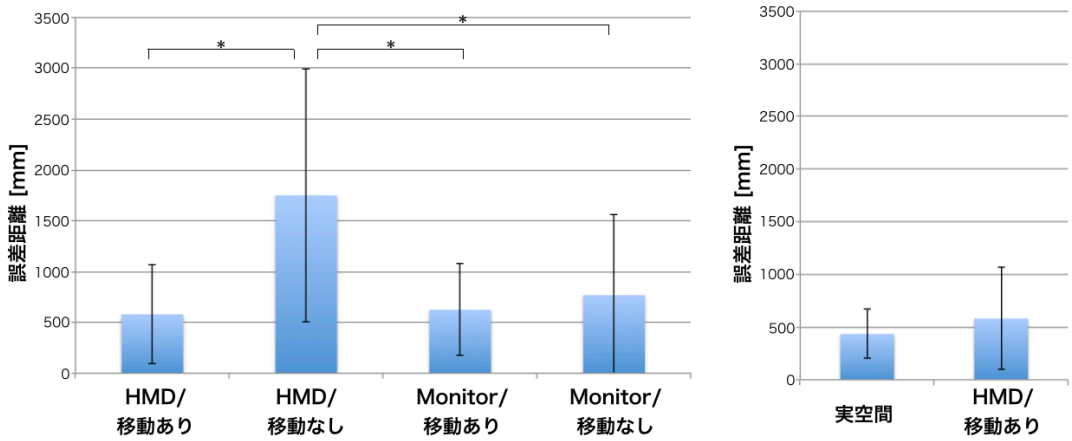

図 4.7 平均誤差距離と標準偏差

実空間での人を基準とした誤差距離は、HMD/移動あり＜Monitor/移動あり＜Monitor/移動なしの順で小さくなっているのが分かる。HMD で移動した場合に、最も実空間に近い距離感を認識していることがわかった。人-HMD/移動あり、人-Monitor/移動あり、人-Monitor/移動なし間で有意差は認められなかった。これらから、「移動」が正確にマーカーの位置関係を認識する上で重要になっていることが分かる。

図 4.8 に各項目の回答視認時間の平均と標準編を示す。回答時間について、各項目に一元配置分散分析と多重比較を行った結果、図中の項目間で有意差が見られた。各項目について「ディスプレイの違い」「移動の有無」「被験者」について、２元配置分散分析を行ったところ、「ディスプレイ」については p=0.008 と 1%の有意差が、「移動」については p=0.015 と 5%の有意差が、「被験者」については p=0.001 と 1%の有意差がそれぞれ見られた。

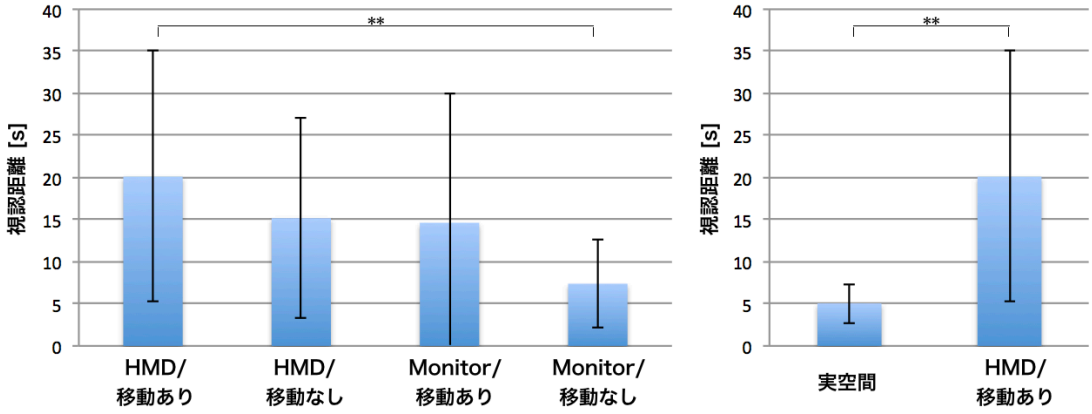

図 4.8 平均回答時間と標準偏差

回答視認時間は、HMD/移動あり＞HMD/移動なし＞Monitor/移動あり＞Monitor/移動なしの順で大きくなっている。HMD/移動あり-Monitor/移動なし間で 1%の有意差が見られた。被験者の回答視認時間が増えた理由としては、移動モジュールの移動、旋回速度が一定のため、マーカーが視認出来る位置まで移動する際に時間を要したことが考えられる。また、モニタの位置を設定する際に、「ディスプレイ時に移動をしなくとも全ての記号がカメラの画角内に収まる位置」と位置を設定したため、モニタ画面を確認するだけでマーカーの位置を把握することが可能だったことが挙げられる。

4.4 アンケートによる主観評価

4.4.1 評価項目

システムの定性的な評価を行うために、実験時にアンケート調査を行った。被験者は、同じく 20～50 台の男性 10 人である。それぞれの実験時に以下のような質問項目を設けた。

●HMD/モニタ、移動あり/なしでの実験について
Q1.映像に対して没入感(その世界に入り込んでいる感覚)を感じましたか？
Q2.映像に対して酔い(頭痛、吐き気、違和感など)を感じましたか？
Q3.記号を認識しやすかったですか？
●HMD を装着し、実験を行った被験者に対して
Q4.「自由見る」という感覚を感じましたか？
Q6.見回せる(頭部の移動ができる)ことによるメリットを感じましたか？
●HMD とモニタそれぞれで移動してもらった実験に対して
Q.5「自由に移動できる」という感覚を感じましたか？
Q10.画面の時間遅れ(キーを押してからの移動のラグ)を感じましたか？
Q8.移動できることによるメリットを感じましたか？
●HMD とモニタ時に移動なしでの実験に対して
Q9.移動できないことによるデメリットを感じましたか？
●モニタでの実験において
Q7.見回せない(頭部の移動がない)ことによるデメリットを感じましたか？

これらの質問項目に対し、「感じなかった」から「感じた」ついて、5 つのメモリ上のどこに位置するのかをプロットしてもらった。(図 4.7)

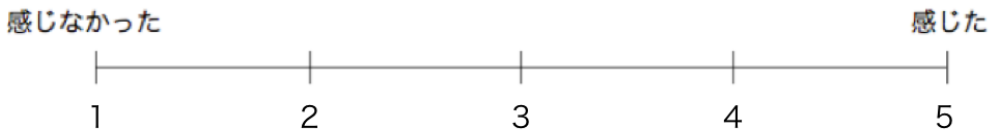

図 4.7 回答項目

4.4.2 結果・考察

得られた項目について、「感じなかった」を 1、「感じた」を 5 として、1 ～ 5 点でそれぞれを点数化した。Q1～5 について、回答の平均と標準偏差をそれぞれ示す。Q6～10 に関しては、回答の割合を示す。それぞれ、n=10 であり、*p < 0.05、**p < 0.01 である。

Q1.映像に対して没入感(その世界に入り込んでいる感覚)を感じましたか？

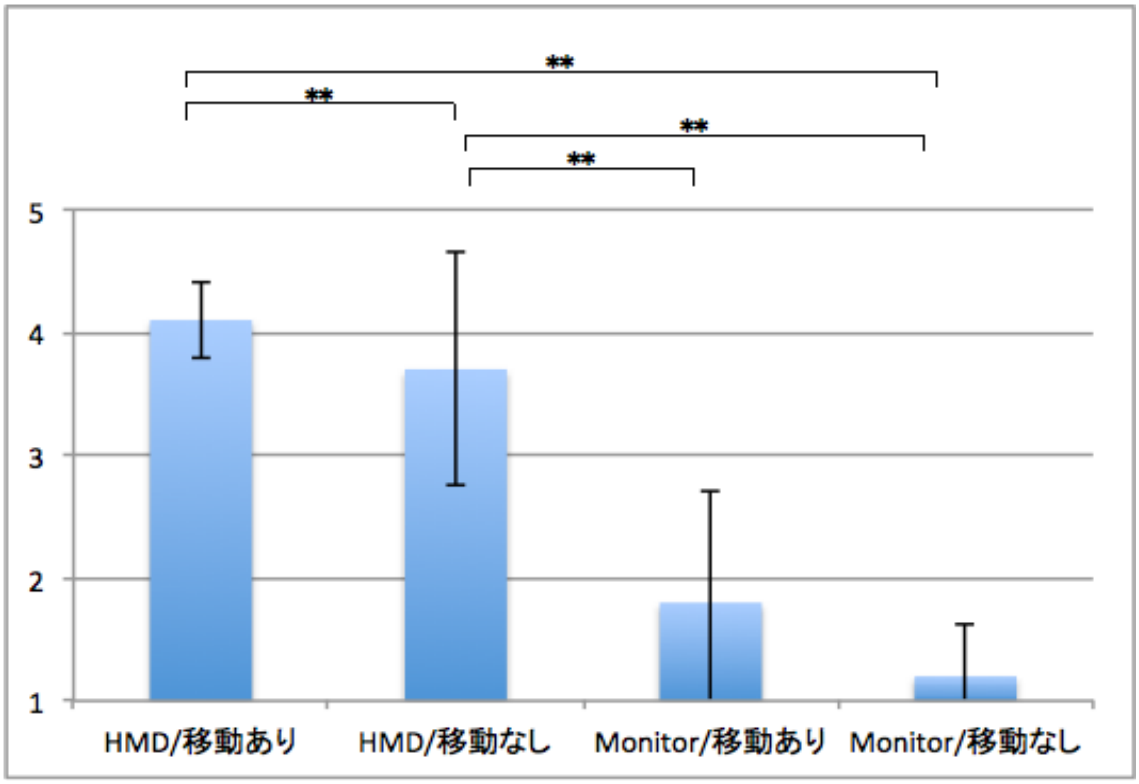

図 4.8 Q1 の平均回答結果と標準偏差

被験者が没入感を感じているかに関して、多重比較の結果、上記の項目間でそれぞれ有意差が見られた。また、「移動の有無」「ディスプレイの違い」を因子に 2 元配置分散分析を行ったところ、「ディスプレイの違い」に関して p=0.00 と 1%の有意差が見られた。また、「移動の有無」に関しては、p=0.03 であり、5%の有意差が見られた。よって、被験者は、本システムで HMD を用いて操作を行うことによって、没入感を感じていると言える。

Q2.映像に対して酔い(頭痛、吐き気、違和感など)を感じましたか？

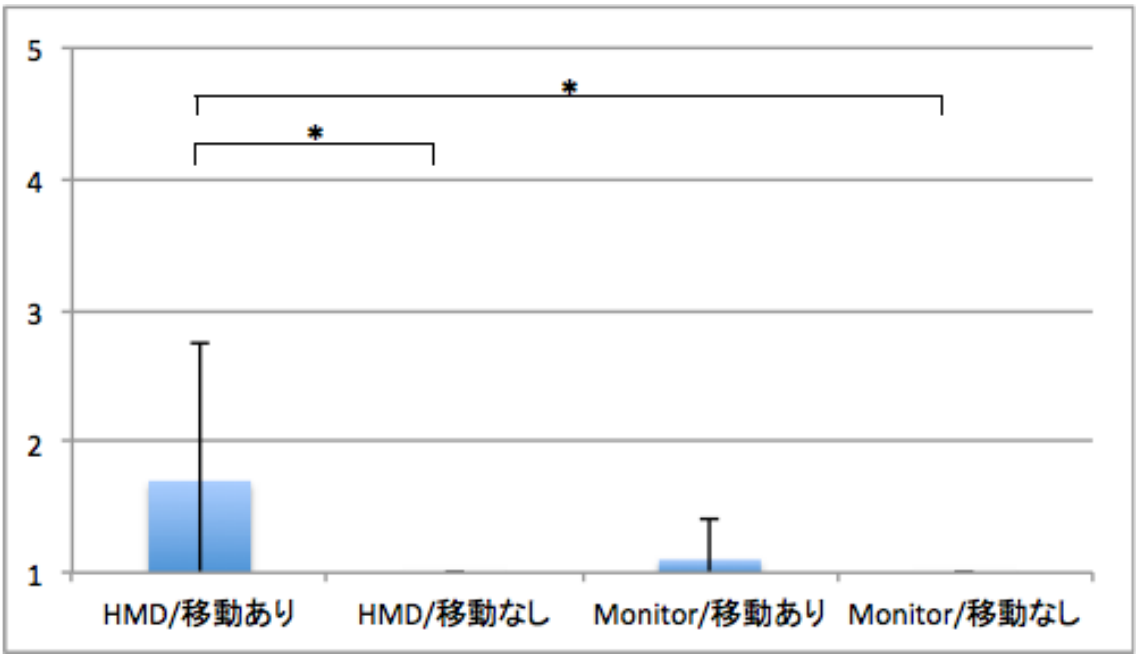

図 4.9 Q2 の平均回答結果と標準偏差

被験者の酔い(違和感)について、検定を行ったところ、上記の項目間で有意差が見られた。また、「移動の有無」「ディスプレイの違い」を因子に 2 元配置分散分析を行ったところ、「移動の有無」に関して p=0.028 と 5%の有意差が見られた。よって、本システムでの移動時は、若干の酔いを与えることにつながる。

Q3.記号を認識しやすかったですか？

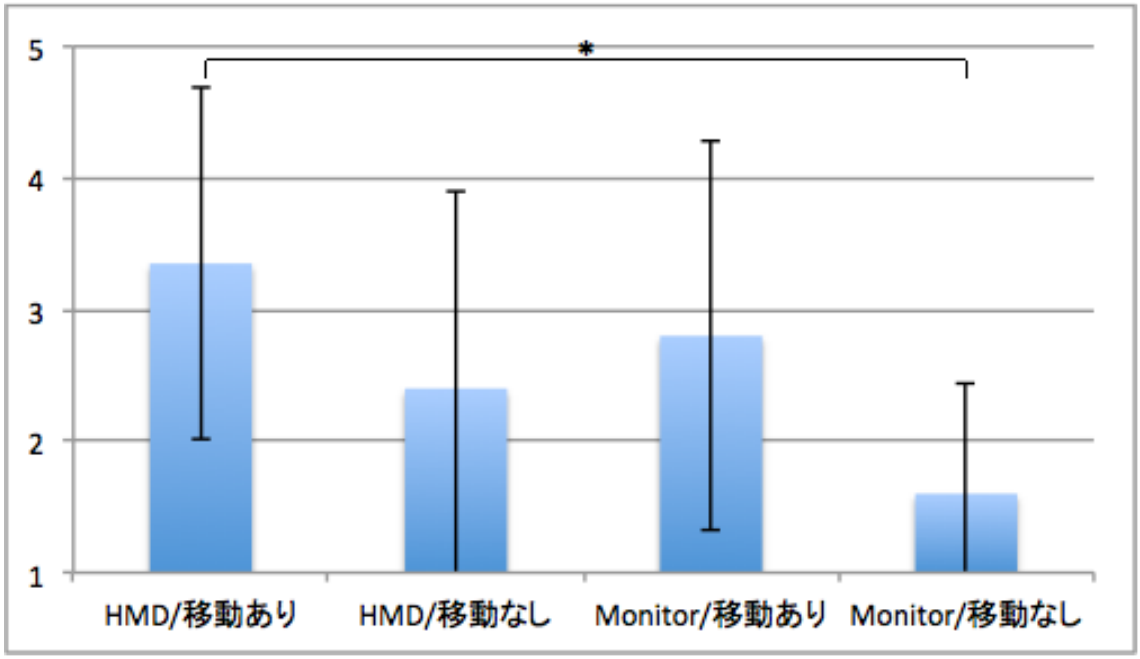

図 4.10 Q3 の平均回答結果と標準偏差

被験者が感じる記号の認識のしやすさについて、検定を行ったところ、上記の項目間で有意差が見られた。また、「移動の有無」「ディスプレイの違い」を因子に 2 元配置分散分析を行ったところ、「移動の有無」に関して p=0.014 と 5%の有意差が見られた。移動を行うことで、被験者は記号を認識しやすくなることがわかった。

Q4.「自由に見る」という感覚を感じましたか？

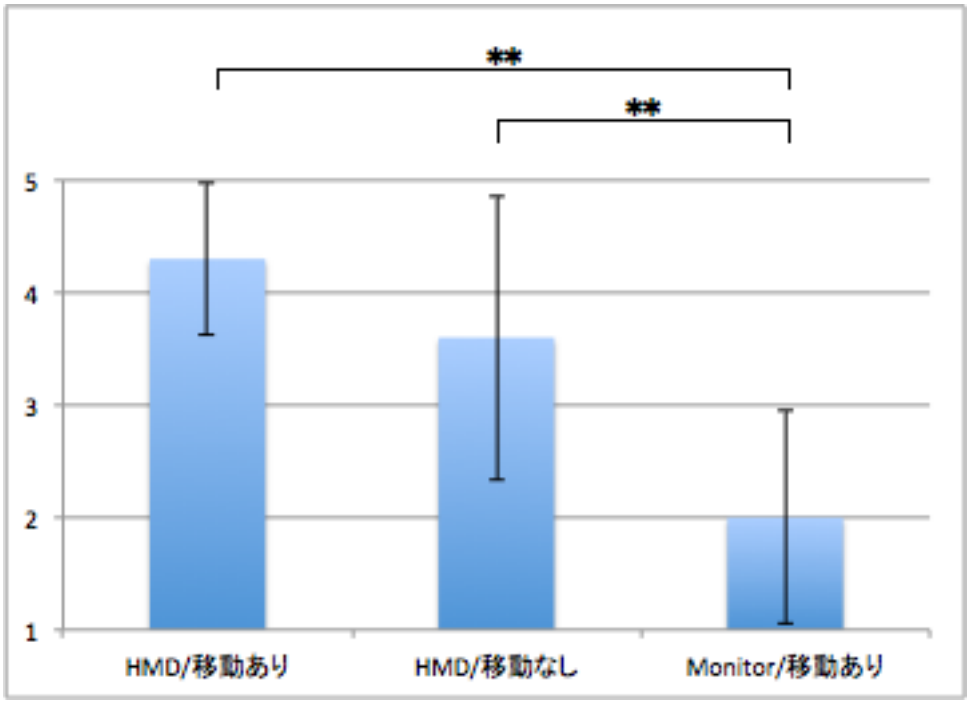

図 4.11 Q4 の平均回答結果と標準偏差

本システムの目的である「自由に見る」ということを、被験者が感じることができるかについて検定を行ったところ、上記の項目間で有意差が見られた。また、「移動の有無」「ディスプレイの違い」を因子に 2 元配置分散分析を行ったところ、「ディスプレイの違い」に関して p=0.00 と 1%の有意差が見られた。よって、HMD を通して映像を確認することで、被験者は「自由に見る」と感じることが出来ていると言える。

Q5.「自由に移動できる」という感覚を感じましたか？

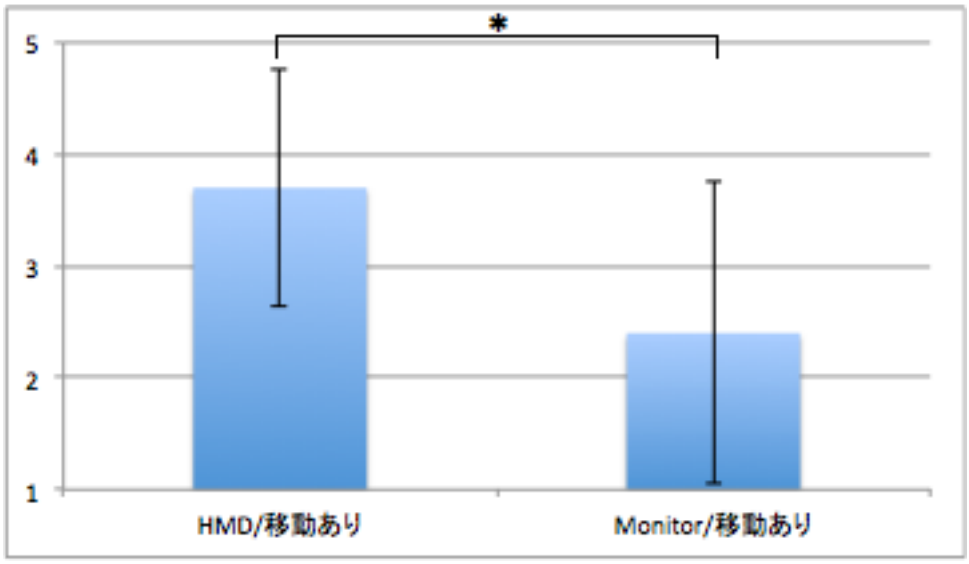

図 4.12 Q5 の平均回答結果と標準偏差

本システムの目的である「自由に移動できる」ということが、被験者が感じることができるかについて検定を行ったところ、p=0.028 と上記の項目間で 5%の有意差が見られた。よって、HMD を使用することでより、被験者が「自由に移動できる」と感じることが出来ていると言える。

Q6.見回せる(頭部の移動ができる)ことによるメリットを感じましたか？

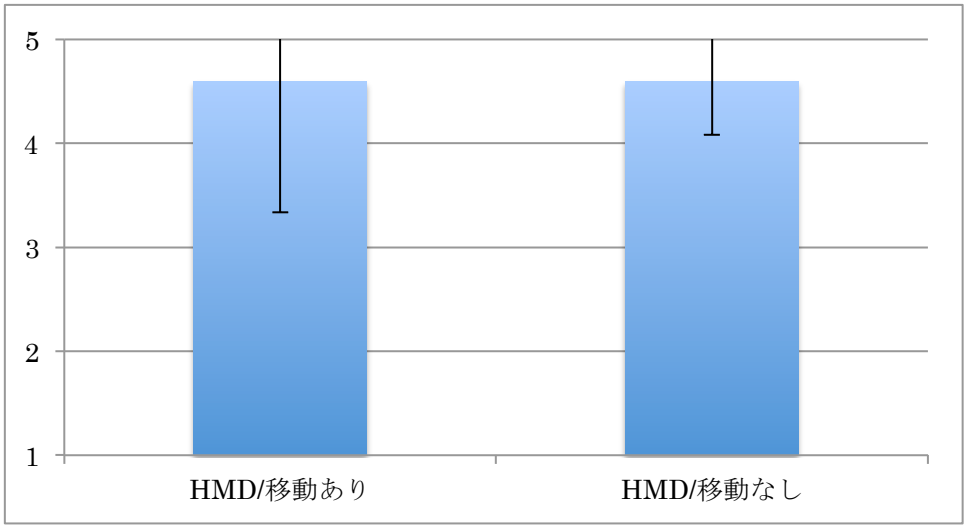

図 4.13 Q 6 の回答結果：(左)HMD/移動あり (右)HMD/移動あり

平均値：(左)4.6 (右)4.6

標準偏差：(左)1.26 (右)0.52

Q7.見回せない(頭部の移動がない)ことによるデメリットを感じましたか？

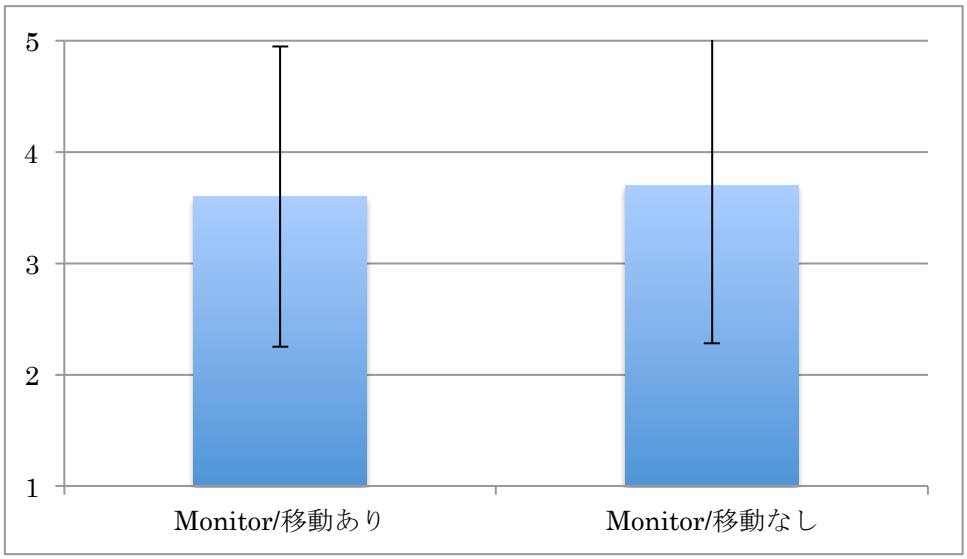

図 4.14 Q7 の回答結果：(左)D/移動あり (右)D/移動なし

平均値：(左)3.6 (右)3.7

標準偏差：(左)1.35 (右)1.42

Q8.移動できることによるメリットを感じましたか？

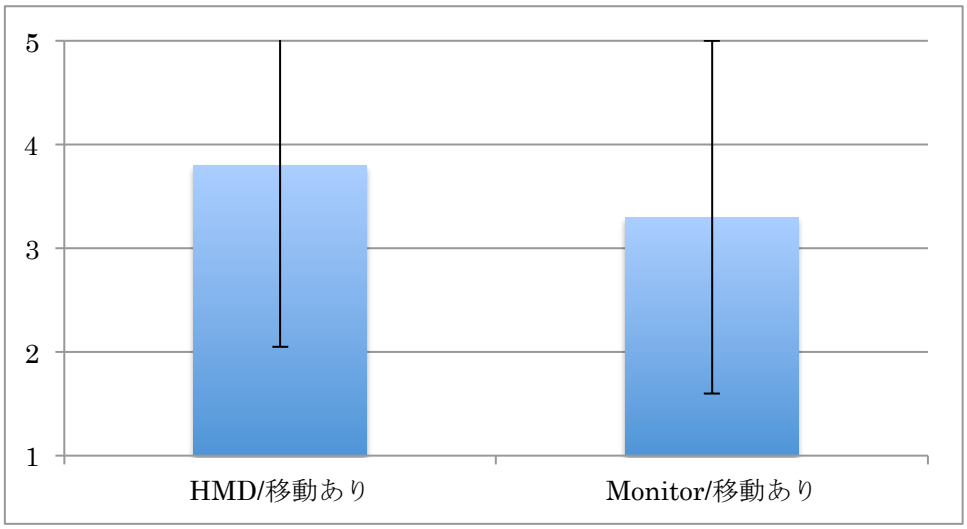

図 4.15 Q8 の回答結果：(左)HMD/移動あり (右)D/移動あり

平均値：(左)3.8 (右)3.3

標準偏差：(左)1.75 (右)1.70

Q9.移動できないことによるデメリットを感じましたか？

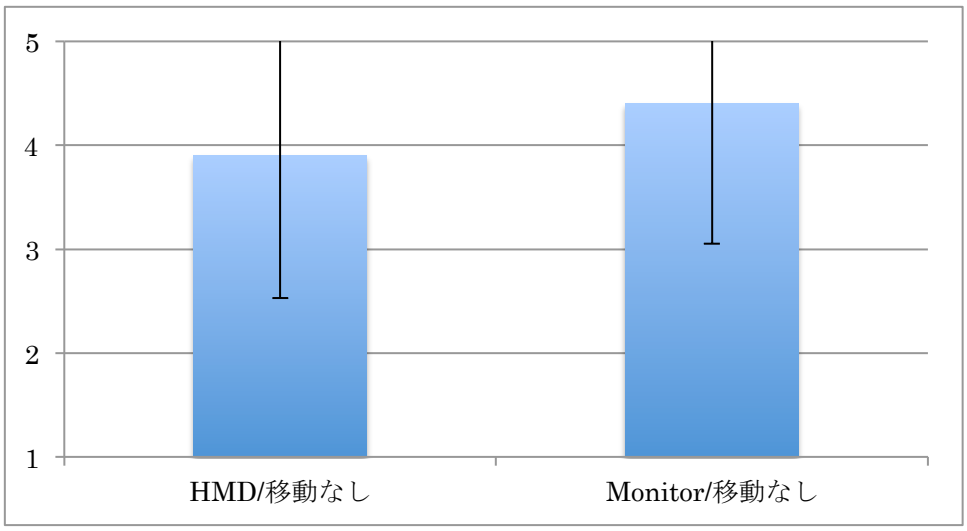

図 4.16 Q9 の回答結果：(左)HMD/移動なし (右)D/移動なし

平均値：(左)3.9 (右)4.4

標準偏差：(左)1.37 (右)1.35

Q10.画面の時間遅れ(キーを押してからの移動のラグ)を感じましたか？

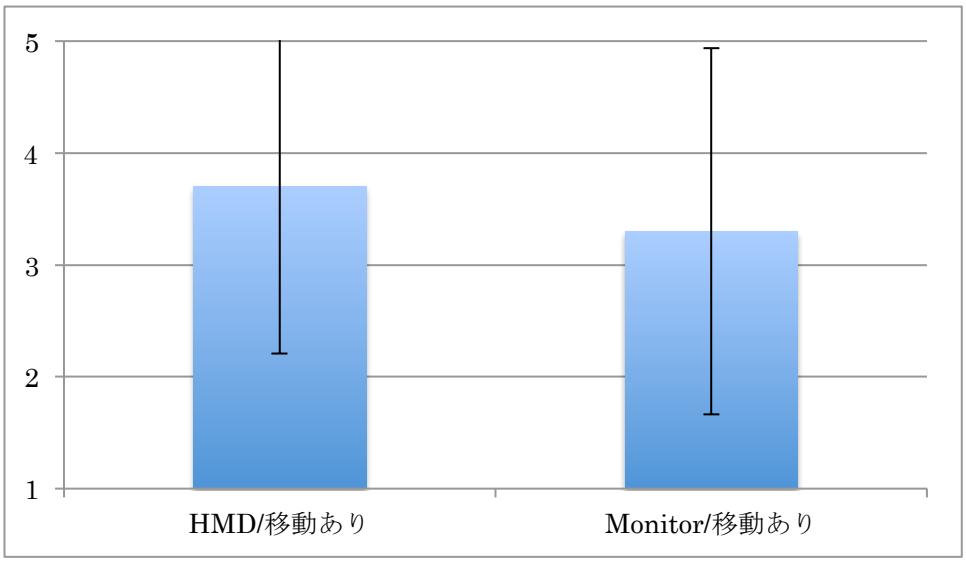

図 4.17 Q10 の回答結果：(左)HMD/移動あり (右)D/移動あり

平均値：(左)3.7 (右)3.3

標準偏差：(左)1.49 (右)1.64

Q6.において「見回せることのメリットを感じたか」どうかについて、回答を得たところ、各項目とも平均が 4.6 と、記号を探す際に、被験者が HMD によって見回せることのメリットを感じていることがわかった。また、Q8.「移動できることによるメリットを感じたか」については、HMD の場合は 6 割以上の被験者が「5」に記録したが、モニタ時との有意差は見られなかった。

「移動と見回しがそれぞれできない時のデメリットを感じるか」については、Q7.での見回しが制限されている際には、D/移動ありの場合の平均は 3.6、D/移動なしについての平均は 3.7 と若干、デメリットを感じる傾向があるが、Q9.での移動が制限されている場合は、HMD/移動なしでの平均が 3.9、D/移動なしでの平均が 4.4 と被験者は移動ができないことによるデメリットを強く感じていることがわかった。

Q10.での映像の時間遅れについては、HMD と、モニタの場合の平均がそれぞれ、3.7 と 3.3 であり、被験者は時間遅れを感じている傾向が見られた。これは、Q2 における被験者が感じる酔いに影響を及ぼしていると思われる。

4.5 システムの妥当性確認

4.5.1 アンケート内容

2 つの実験とアンケート調査を通して、「自由に見る・移動できる遠隔没入システム」の要件を満たしたシステムができたことを確認した。よって、本研究の最終的な目的である、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システムの基本的機能を満たした状態とした。そこで、本システムを、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できるのかをアンケートを通して確認した。ユーザが日常生活の中で気軽に使えるかどうかは、①システムを日常生活の中で使用したいと思うのか②どのぐらいの頻度で使用したいと思うのかを評価することで、システムの有効性を示す。これらを検証する為に、それぞれ以下のような質問項目を設けた。

①システムを日常生活の中で使用したいと思うのか
Q1.日常生活の中で、本システムを利用してコンテンツ(スポーツ観戦、遠隔地体験など)を観覧したいと思いますか？
Q2.その理由を教えてください
Q3.どのようなシーンで使用したいと思いますか？/出来たら使用したいと思いますか？
②どのぐらいの頻度で使用したいと思うのか
Q4.日常生活においてどのくらいの頻度で使用すると思いますか？

これらの質問を通してシステムの妥当性確認を行う。

4.5.2 結果・考察

結果をそれぞれ以下に示す。

Q1.日常生活の中で、本システムを利用してコンテンツ(スポーツ観戦、遠隔地体験など)を観覧したいと思いますか？

得られた項目について、「思わない」を 1、「思う」を 5 として、1 ～ 5 点でそれぞれを点数化した。

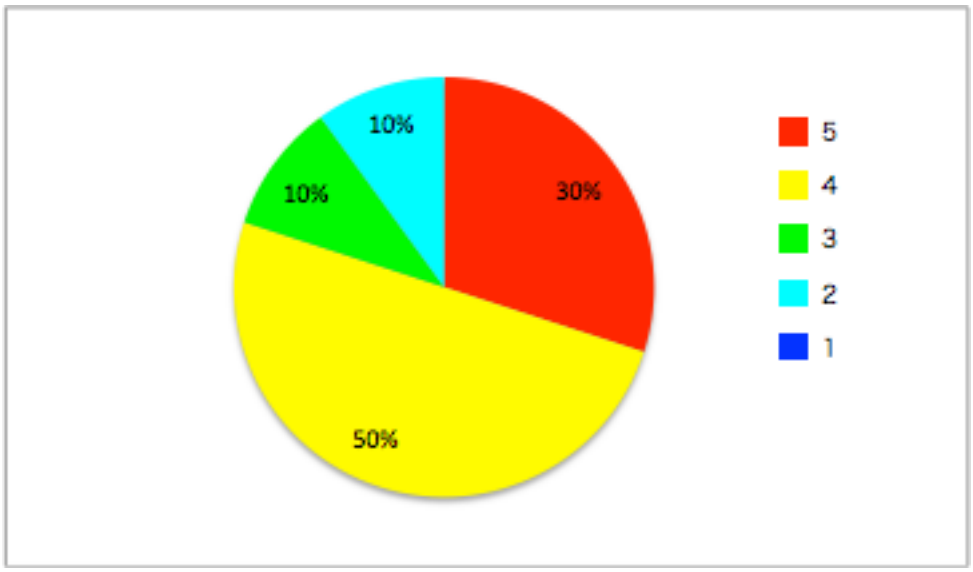

図 4.18 Q1 の回答結果

平均値：4

標準偏差：0.94

Q2. その理由を教えてください

表 4.1 評価点数と理由一覧

評価点数	理由
5	実際にある世界を離れた安全な場所から自由に見渡せるから
	面白そうだと思う為
4	楽しそう
	好きな視点で見ることができる為、周りが見渡せる為

	普段見ることが出来ない角度で見たい
	臨場感が得られて実際に行っている感覚になる
	多少画質が気になる
3	理由は特にない
2	画質が悪いから

(有効回答数：9)

被験者の本システムの使用意欲について、図 4.18 を見てみると平均値が 4 と、被験者の多くが本システムを使用したいと思っていることがわかった。その理由として、「好きな視点でみることができる」「自由に見渡せる」「普段みることが出来ない角度で見たい」等、視点を自由に動かせることによる「見回し」が使用のモチベーションにつながっていると思われる。

一方、使用意欲が比較的低い被験者に関しては、「画質が悪い」等、システムの品質に関した意見が聞かれた。また、システムに対して自由コメントを求めた際にも画質に対する要求が聞かれた。

Q3. どのようなシーンで使用したい/出来たなら使用したいと思いますか？

表 4.2 システムを使用したいシーン

シーン
セキュリティ、家を空けている時
ゲーム
監視
誰か隣にいて、一緒に見るような状況
サッカー観戦、家での忘れ物の確認、火の元
ポーカー
会社に設置しての自宅勤務、旅行
行くのに 10 万円以上かかるとか、資格が必要だとか、時間が間に合わないなどの場合に自由にみることが出来たら良いと思う

(有効回答数：8)

Q4.日常生活において、どのくらいの頻度で使用すると思いますか？

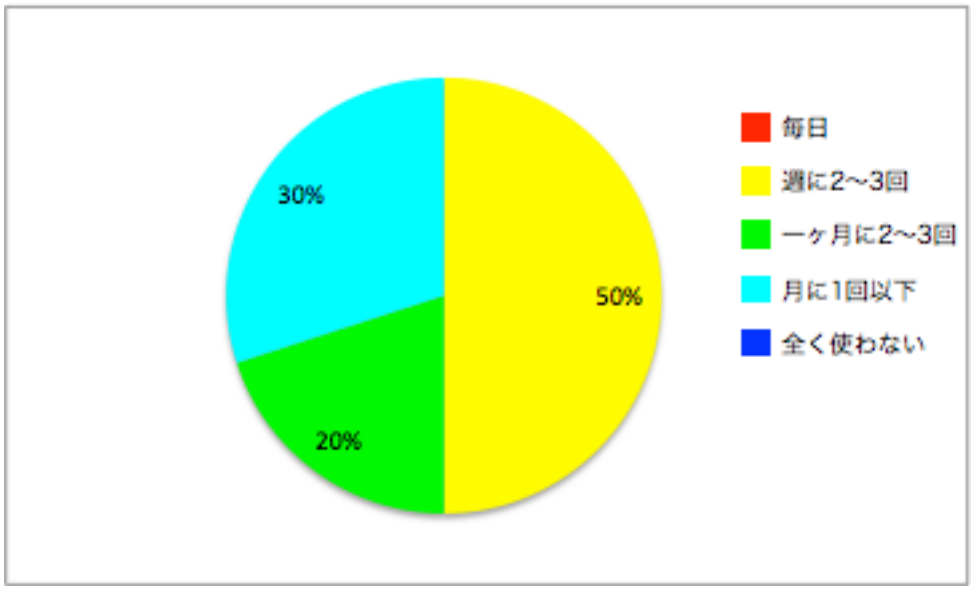

図 4.19 Q4 の回答結果

システムに対する使用頻度は「週に 2～3 回」が一番多く、半数ほど見られ、少なくとも月に 1 回は使用するとの回答を得た。また、使用したいシーンについても、監視や家のセキュリティなどすでにあるサービス以外の分野では、旅行、自宅勤務、スポーツ観戦など移動や見回しが必要となり、従来の遠隔没入システムでは実現が難しいような分野での使用の要望が見込まれた。

以上をまとめると、①「システムを日常生活の中で使用したいと思うのか」に関しては、8 割の被験者がシステムに対して 4 点以上の評価をしており、システムの使用に対するモチベーションは高いと言える。また、②「どのぐらいの頻度で使用したいと思うのか」に関しては、「使わない」と思う被験者はいなかった。これらによって、開発した本システムは、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入システムになりうるであろう。

第5章

まとめ

5.1 結論

本研究では、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入体験システムの開発を最終的な目標に設定した。その中で、一般消費者が製品に求める基本的な要求の中の因子のうち、「基本的機能の性能」に着目し、遠隔没入システムが持つべき基本的機能の要求を満たしたシステムを開発することで、目標の達成に寄与することを目指した。遠隔没入システムが持つべき基本的機能の要求を導き出す上で、人々が持っている「遠隔地を自由に移動したい」と言う要求を考慮し、「自由に見る・移動出来る遠隔没入体験システム」を目標達成のために開発すべきシステムとし、目的に設定した。

「自由に見る・移動出来る遠隔没入体験システム」を実現するにあたり、本研究はVRシステムを構築することを前提に、VRシステムが満たすべき要件から「自由に見る・移動する」システムが満たすべき要件を抽出していった。また、専用の高速回線を使うのではなく、あらゆる遠隔地への没入体験を提供すると言う前提から、インターネット通信によるネットワーク性をシステムの要件として設定し、システムを構築した。結果、機能要求を実現するシステムとして、HMDと360度カメラを組み合わせたシステムを構築した。

構築したシステムについて、2つの実験を通して検証を行った結果、移動モジュールを正確に移動させるには、HMDによる「見回し」が有意であることがわかった。また、人間と同じように空間の位置関係を把握するには、HMDを用いて見回しながら移動を行うことで、実際の人間に近い空間把握ができることがわかった。その中でも、「移動」に有意差が認められた。よって、「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システム」が構築できたと言える。

そして、システムの最終目標である、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入体験システムに必要な基本的機能を満たした上で、一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できるのかをアンケートを通して評価することで、構築したシステムの妥当性確認を行った。結果、一般ユーザのシステム使用のモチベーションは高く、普段のシーンでも利用できることが示された。

5.2 課題と展望

研究の最終目標である一般ユーザが普段の生活の中で気軽に利用できる遠隔没入体験システムの開発を達成する上で、本研究は一般消費者が製品に求める基本的な要求である「基本的機能の性能」「時間的な機能劣化や維持、経済性」「オプション等による機能の拡大」「生活環境との調和」「製品の仕様に伴う安全、保守」の５つの評価因子のうち、遠隔没入システムが持つべき基本的機能の要求を満たしたシステムを構築することで、最終目標の実現に寄与すると言う形をとった。よって、今回の研究では、本来、一般消費者が持つであろう、安全性や経済性、デザイン性といった要因は取り扱っていない。なので、最終目標を達成するには、それらの要素も考慮する必要が有る。

また、本システムの目的である「自由に見る・移動できる遠隔没入体験システム」の要件のうち、人間の目の解像度の問題から「高解像度」を追求することはシステムの対象外と設定し、現行のコンシューマ向け HMD を使用することを前提とした。その結果、解像度の問題から、検証実験中に提示したマーカーが読み取れないといった問題が発生した。今後、スポーツ観戦などといった分野に応用するのであれば、高解像度の実現を目指していく必要が有る。今回は、HMD の開発が目的ではなかったので、入手可能な HMD の中でも高い解像度(1920×1080)を持つものを選定したが、市販が予定されている HMD の中には 5120×1440 といった今回使用したものよりも高い解像度を持つものもある。こういった HMD を使用することで、解像度の問題も解決できる可能性がある。

高い解像度を提示するにあたり、もう一つ問題となるのが通信速度である。従来のテレイマージョンシステムは、大容量のデータを送るために専用の高速回線を必要としていた。また、リアルタイムでの遠隔通信を行う遠隔没入システムも、LAN ケーブルなどを通して有線でデータを送信していたり、通信範囲が限られる UHF 無線で送信していた。本研究では、高い遠隔性を確立するため、グローバルエリアネットワークを用いたインターネット通信を採用した。そのため、ユーザはインターネット接続ができる環境ならば、自宅にいながら世界中の好きな場所での没入体験を味わえるが、通信速度の問題から映像の安定性・時間遅れは無視できなくなってしまう。実際に、構築システムでも約 1 秒ほどの時間遅れがみられ、被験者からは「映像のラグが気になる」との声が聞

かれた。そのため、時間遅延を補うための操作支援手法の開発が必要である。

これらの問題を解決することによって、ユーザはさらに高い没入感を感じながら遠隔地を自由に移動できる。これによって、旅行、スポーツ・ライブ観戦などといった分野に応用が可能である。このような娯楽の分野以外にも、ショッピングや家の確認といった日常生活の分野、機材の遠隔操作や会議といったビジネスの分野など幅広い分野での応用が可能となるであろう。本研究が、その一助になることを期待する。

謝辞

本論文の執筆にあたり、慶応義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科の小木哲朗教授、副査を担当して下さった神武直彦准教授、メディア・システム研究室の伊藤研一郎研究推奨助教、研究員の栗田祐輔さんに丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いたメディアシステム研究室の皆様に感謝します。

2016 年 1 月 29 日

慶應義塾大学大学院
システムデザイン・マネジメント研究科
笛木 康人

外部発表

ⅰ. 笛木康人, 小木哲朗：360 度実写映像空間のインタラクティブ体験, 第 27 回テレイマージョン技術研究会, 盛岡 (2015)

ⅱ. 笛木康人, 小木哲朗 : HMD による 360 度実写映像空間体験時の距離感の評価, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.366-367, 東京 (2015)

参考文献

[1] “TrendForce Forecasts VR Market Value to Hit US$70 Billion in 2020 as Innovative Apps Enrich This Industry”, Jason Tsai, http://press.trendforce.com /node/view/2210.html, (acceded 2016-01-29)

[2] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝, 日本バーチャルリアリティ学会：バーチャルリアリティ学, 第 1 版, コロナ社, 東京, 337–341 (2010)

[3] “Anybot’s QB”, http://www.anybots.com/, (acceded 2016-01-29)

[4] “Double”, http://www.doublerobotics.com/, (acceded 2016-01-29)

[5] “InstanTRIP”, http://instantrip.global/, (acceded 2016-01-29)

[6] “ittaki”, http://www.ittaki.com/, (acceded 2016-01-29)

[7] “Omnipresent”, http://www.omnipresenz.com/, (acceded 2016-01-29)

[8] 酒井満隆, 小木哲朗：テレイマージョン環境における 3 次元ビデオアバタの実時間表現, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, 福岡, (2007)

[9] 小木哲朗, 左近浩章：テレイマージョン技術を用いた遠隔授業システムの構築, 第 16 回設計工学・システム部門講演会講演論文集（Design & Systems Conference’06）, pp.343-344 (2006)

[10] 加藤伸明, 南澤孝太, 新居英明, 川上直樹, 舘 暲:放射状カメラによる実時間全周囲立体映像撮像システム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.13, no.3 (2008)

[11] 秋庭雅夫, 園川：製品品質に対する消費者の評価構造と製品によるその特徴, 日本経営工学会誌 JIMA, Vol.31, No.2, p.207-213 (1980)

[12] 舘暲：バーチャルリアリティとは, http://www.vrsj.org/about/virtualreality/, (acceded 2016-01-29)

[13] Zeltzer, D.: Autonomy, interaction and presence, Presence, 1(1), 127-132 (1992)

[14] 寺本渉他：臨場感の素朴な理解, TVRSJ, Vol.15(1), pp.7-16 (2010)

[15] 畑田豊彦 ： 高臨場感を生み出す視覚特性, 映像情報メディア学会技術報告, AIT98-24, pp.7-11 (1998)

[16] “Notes on the Resolution and Other Details of the Human Eye” Roger N. Clark, http://www.clarkvision.com/imagedetail/eye-resolution.html (2016)

[17] 畑田豊彦, 坂田晴夫, 日下秀夫：画面サイズによる方向感覚誘導効果” テレビ学会誌,Vol.33, No.5, pp.407 -413 (1979)
[18] 柳在鎬, 橋本直己, 佐藤誠:没入型ディスプレイにおける視覚誘導自己運動の分析, 信学技報, MVE 2003 - 24 (2003)
[19] 竹下佳佑, 渡邊孝一, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲：テレイグジスタンスの研究（第 62 報）TELESAR3 システムの遅延の評価, 日本機械学会 ロボティ クス・メカトロニクス講演会（Robomec2010）論文集, 1A1-F28 (2010)
[20] 竹下佳佑, 渡邊孝一, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲：テレイグジスタンスの研究（第 63 報）-TELESAR3 において許容される通信遅延の検討-, 第 15 回日本 バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2010)
[21] Robert S. Allison, Laurence R. Harris, Michael Jenkin, Urszula Jasiobedzka, James E. Zacher : Tol- erance of Temporal Delay in Virtual Environments, vr, pp.247, IEEE Virtual Reality Conference 2001 (VR 2001)
[22] 斉藤米蔵, 平野秀利, 黒瀬雅之, 山田好秋：電子式 Goniometer を用いた頭部屈曲・回転運動時の関節可動域の解析と運動軌跡の観察, 顎機能誌, 13:21-30 (2006)
[23] Jacques TISSEAU：バーチャルリアリティと複雑性, CERV (2004)
[24] 真田克彦:教育における VR 利用のシミュレーション, 鹿児島大学教育学部研究紀要 教育科学編 Vol.52 p.19 -35 (2001)
[25] 廣多馨, 稲見昌彦:広域分散型ロボットを用いたユビキタステレイグジスタンスの研究, 慶応義塾大学, 修士論文 (2012)
[26] 古川正紘, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲：テレイグジスタンスの研究（第 66 報） Telesar5 のための視聴覚伝送系の設計, エンタテイメントコンピューティング (2011)
[27] 林, 横小路, 吉川 : 不整地走行する遠隔操縦型移動ロボットの視覚提示の振動抑制と遅れ補償に関する研究, 日本ロボット学会第 21 回学術講演会予稿集, 2L14 (2003)
[28] 林政也 : 移動ロボットの遠隔操作におけるカメラ支援, 三重大学, 修士論文 (2007)
[29] 舘暲,荒井：テレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.4, pp.314-326 (1989)
[30] 横矢直和, 山澤一誠, 竹村治雄:全方位ビデオカメラを用いた視覚情報メデ

ィア, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42, No.SIG13, pp.59-70 (2001)
[31] 米田美里, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和 : 全方位動画像からの両眼ステレオ画像生成による移動ロボットの遠隔操縦, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2000- 107 (2000)
[32] 石川智也, 山澤一 誠□, 横矢直和:複数の全方位動画像を用いた自由. 視点テレプレゼンス, 映像情報メディア学会誌, Vol . 60, No.10, pp.1599-1610 (2006)
[33] 鄭立 : Zig Bee 開発ハンドブック, 第 1 版, リックテレコム, p49 (2006)